



Grado en Ingeniería Informática

Curso 2016/2017

Trabajo Fin de Grado

**Adaptación de una Plataforma
Robótica Social e Interactiva
para su Uso en Rehabilitación
Bimanual Intensiva**

Enrique García Estévez

Tutor: José Carlos Pulido Pascual

Colmenarejo, 10 de Octubre de 2017

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ADAPTACIÓN DE UNA PLATAFORMA
ROBÓTICA SOCIAL E INTERACTIVA
PARA SU USO EN REHABILITACIÓN
BIMANUAL INTENSIVA**

Autor: GARCÍA ESTÉVEZ, ENRIQUE
Tutor: PULIDO PASCUAL, JOSÉ CARLOS

TRIBUNAL

Presidente: MARTÍNEZ FÉRNANDEZ, PALOMA
Secretario: GONZÁLEZ MANZANO, LORENA
Vocal: RAMIREZ JIMÉNEZ, RAFAEL
Suplente: BERLANGA DE JESÚS, ANTONIO,

Tras el acto de defensa y lectura el día 10 de Octubre de 2017 en la **Escuela Politécnica Superior** de la **Universidad Carlos III** de Madrid (Colmenarejo), el tribunal le otorga la siguiente **CALIFICACIÓN**:

Email

enrique.garcia@alumnos.uc3m.es

Teléfono

+34 620 21 98 68

Dirección

Universidad Carlos III de Madrid

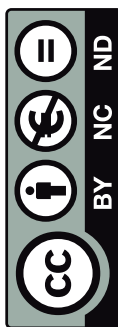
Escuela Politécnica Superior

Avda. de Gregorio Peces-Barba Martínez, 22

28270 Colmenarejo (Madrid) - SPAIN

Por favor, cita este trabajo como:

G^a Estévez, Enrique. *Adaptación de una Plataforma Robótica Social e Interactiva para su Uso en Rehabilitación Bimanual Intensiva*, Bachelor thesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2017.



This work is distributed under the Creative Commons 3.0 license. You are free to copy, distribute and transmit the work under the following conditions: (i) you must attribute the work in the manner specified by the author or licensor (but not in any way that suggests that they endorse you or your use of the work); (ii) you may not use this work for commercial purposes, and; (iii) you may not alter, transform, or build upon this work. Any of the above conditions can be waived if you get permission from the copyright holder. See <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/> for further details.

Quisiera dar las gracias en especial...
a mis padres, Carmen y Enrique, por toda la educación proporcionada,
a mis sobrinos, Fer y Ari, por haber sido mis “conejiillos de indias”,
a Almudena por estar siempre ahí y ser mi apoyo incondicional,
a mi hermana Melania, la “cojoterapeuta”, por su inestimable ayuda en este proyecto,
al grupo PLG por su hospitalidad y gran recibimiento,
y a José Carlos por haber sido el mejor tutor y compañero de trabajo que podría tener.

Abstract

The NaoTherapist platform is a robotic system whose goal is to develop socially interactive rehabilitation sessions for pediatric patients with physical disabilities. This project started as a support tool in rehabilitation therapies with children, since sessions require a greater continuous attention on the part of the therapists and a greater need of motivation, masking the rehabilitation exercises in a game environment. Although this therapeutic tool was already evaluated with the real patients in a long-term evaluation, it was suggested that the system participates in an Intensive Therapy field for patients with Cerebral Palsy. Something that finally took place in July 2017.

All this presents new challenges in the NaoTherapist project, which should be considered to provide a better daily experience for the participants involved, according to the HABIT methodology used in the camp. This document describes the entire development process followed for the elaboration of new components that seek to perfect the robotic rehabilitation model, both with the inclusion of new therapeutic games with NAO and with the individualized adaptation to the users, that allow to improve the interaction with the users, thus providing greater motivation and adherence in their treatment. There is also work on the update of some components already developed, as the module of gestural recognition and monitoring of patients, which require a change in order to be compatible with the new version of the Kinect sensor.

This document outlines the various stages of development that have taken place: problem solving and document search, analysis and capture of requirements through interviews with expert therapists, design and implementation of the components, and testing phase. Throughout this exhibition are joined chapters especially dedicated to the possible implementation of the project as a business, and to the legislative framework applicable to such a project. It should be noted that all the work completed culminates with an evaluation of the platform in a real clinical environment, with real patients, and a conference publication.

Keywords

Physical Rehabilitation, Intensive Neurorehabilitation, Assistive Social Robotics, Robotic Rehabilitation Model, Postures Recognition, Automatic Therapy Sessions Planning, Patient Adaptation System, NaoTherapist.

Resumen

La plataforma NaoTherapist es un sistema robótico cuyo objetivo es desarrollar sesiones de rehabilitación socialmente interactivas para pacientes pediátricos con impedimentos físicos. Este proyecto se inició como una herramienta de apoyo en las terapias de rehabilitación con niños, pues éstas requieren una mayor atención continua por parte de los terapeutas y una mayor necesidad de motivación, enmascarando los ejercicios de rehabilitación en un entorno de juego. Aunque esta herramienta terapéutica ya fue evaluada con los pacientes reales en una evaluación a largo plazo, se planteó que el sistema participara en un campo de Terapia Intensiva para pacientes con Parálisis Cerebral. Algo que finalmente ha tenido lugar en julio de 2017.

Todo esto presenta nuevos retos en el proyecto NaoTherapist, que deben ser considerados para proporcionar una mejor experiencia diaria a los participantes involucrados, de acuerdo a la metodología HABIT empleada en dicho campamento. Este trabajo describe todo el proceso de desarrollo seguido para la elaboración de nuevos componentes que buscan perfeccionar el modelo de rehabilitación robótica, tanto con la inclusión de nuevos juegos terapéuticos con NAO como con la adaptación individualizada a los usuarios, que permitan mejorar la interacción con los usuarios, proporcionando así una mayor motivación y adherencia en su tratamiento. También se ha trabajado en la actualización de algunos componentes ya desarrollados como el módulo de reconocimiento gestual y monitorización de los pacientes, el cual requería un cambio en pos de ser compatible con la nueva versión del sensor Kinect.

Durante este documento se exponen las diversas etapas de desarrollo por las que se ha pasado: planteamiento del problema y búsqueda de documentación, análisis y captura de requisitos mediante entrevistas con terapeutas expertos, diseño e implementación de los componentes, y fase de pruebas. A toda esta exposición se unen unos capítulos especialmente dedicados a la posible puesta en marcha del proyecto como negocio empresarial, y al marco legislativo aplicable a un proyecto de estas características. Cabe destacar que todo el trabajo realizado culmina con una evaluación de la plataforma en un entorno clínico real, con pacientes reales, y una publicación de conferencia.

Palabras clave

Rehabilitación Física, Neurorehabilitación Intensiva, Robótica Social Asistiva, Modelo Robótico de Rehabilitación, Reconocimiento Postural, Planificación Automática de Sesiones de Terapia, Sistema de Adaptación al Paciente, NaoTherapist.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Motivación	5
1.3. Objetivos del Trabajo	8
1.4. Estructura del Documento	10
2. Estado de la Cuestión	13
2.1. Robótica Social de Asistencia	13
2.2. Planificación Automática	17
2.3. Sistemas de Reconocimiento de Posturas	20
3. Contexto de Trabajo	23
3.1. Arquitectura NaoTherapist	24
3.2. Sensor de Movimiento Kinect v2	27
3.2.1. ZeroICE	30
3.2.2. WinKinectComp	30
3.3. PELEA	31
3.3.1. Metric-FF	32
3.3.2. Planning Domain Definition Language (PDDL)	33
4. Análisis de la Plataforma	37
4.1. Mejoras Analizadas	38
4.2. Escenarios	41

4.3. Diagramas de Casos de Uso	52
4.4. Requisitos	56
5. Diseño e Implementación	65
5.1. Reconocimiento de Poses	66
5.1.1. Modelo Antropométrico Articular	66
5.1.2. Interfaz Gráfica de VisionComp	72
5.1.3. Catálogo de Poses	75
5.1.4. Comparación entre Pose Esperada y Capturada	76
5.2. Planificación de Sesiones de Terapia	78
5.2.1. Generalización del Dominio	79
5.2.2. Modelado de Nuevas Actividades	82
5.2.2.1. Mejoras en el Juego del Mirror	82
5.2.2.2. Nuevo Diseño del Juego Memory (Antiguo Simón)	84
5.2.2.3. Modelado del Juego Inverse Memory	85
5.2.2.4. Modelado del Juego Nao Says	86
5.3. Sistema de Adaptación al Usuario	88
5.3.1. Sistema de Umbrales Personales	89
5.3.2. Adaptación de las Posturas	91
5.3.3. Personalización de las Sesiones	93
6. Experimentación y Pruebas	97
6.1. Planificación de Sesiones de Terapia	98
6.1.1. Rendimiento Dominio Antiguo vs Nuevo	98
6.1.2. Rendimiento de una Sesión Mixta	100
6.2. Pruebas de Ejecución en Laboratorio	101
6.3. Evaluación Clínica con Pacientes Reales	103
7. Marco Regulador	109
7.1. Protección de Datos	109
7.2. Certificados Clínicos de Actividad	111

7.2.1. Certificado IEC/EN 60601	113
7.3. Registro de Modelos de Utilidad	114
8. Entorno Socio-Económico	115
8.1. Planificación	115
8.2. Presupuesto	121
8.2.1. Recursos Materiales	122
8.2.2. Recursos Humanos	124
8.3. Análisis Comercial	125
8.4. Emprendimiento Económico	127
8.5. Impacto Social	129
9. Conclusiones y Líneas Futuras	131
9.1. Conclusiones	131
9.1.1. Módulo de Monitorización	132
9.1.2. Planificación de Sesiones	133
9.1.3. Sistema de Adaptación al Usuario	134
9.2. Líneas de Trabajo Futuro	135
Bibliografía	137
I. Work Summary	149
I.1. Introduction and Motivation	149
I.2. Objectives and Development	153
I.3. Conclusions and Future Work	157
II. Catálogo de las Poses Incorporadas a la Plataforma NaoTherapist	163
IIIDatos sobre la Progresión de la Movilidad Articular de los Pacientes participantes en el Campamento de Terapia Intensiva	167
III.1. Progresión de Diego (pt01)	168
III.2. Progresión de Lucas (pt02)	170
III.3. Progresión de Jorge (pt03)	172

III.4. Progresión de Santiago (pt04)	174
III.5. Progresión de Mario (pt05)	176
III.6. Progresión de Marta (pt06)	178
III.7. Progresión de Andrea (pt07)	180
III.8. Progresión de Hector (pt08)	182
III.9. Progresión de Miguel (pt09)	184
III.10 Progresión de Víctor (pt10)	186
 IV. Artículo Elaborado	
y Aceptado para la Conferencia	
<i>ROBOT'2017 - Third Iberian Robotics Conference</i>	189

Índice de figuras

1.1. Lesión en el Plexo Braquial.	4
1.2. Robot NAO.	6
1.3. Proceso de Terapia con NaoTherapist en HABIT.	9
2.1. Taxonomía de la Robótica Social.	15
2.2. Robot Ursus.	16
2.3. Problema del Mundo de los bloques.	18
2.4. Sensores de Movimiento.	20
3.1. Niveles de Planificación en NaoTherapist.	24
3.2. Arquitectura de la Plataforma NaoTherapist.	26
3.3. Sensor Kinect v2 y sus Componentes.	27
3.4. Sistema de Detección de Profundidad.	28
3.5. Esqueleto Generado por Kinect.	29
3.6. Cara Generada por Kinect.	29
3.7. Arquitectura PELEA de Dos Niveles.	31
3.8. Problema del Mundo de los Bloques en PDDL.	34
3.9. Dominio del Mundo de los Bloques en PDDL.	35
4.1. Notación de los Diagramas de Casos de Uso.	52
5.1. Modelo de Datos RoboCompMSKBody.	67
5.2. Definición de Ángulo Articular.	68
5.3. Definición de los Planos Corporales.	68

5.4. Movimientos Articulares del Hombro y el Cálculo de sus Ángulos.	69
5.5. Elementos Añadidos a la Interfaz KinectModel.	72
5.6. Interfaz Gráfica del Componente <i>Vision</i>	73
5.7. Definición XML de una Postura.	75
5.8. Modelo de los Resultados de Comparación.	76
5.9. Flujo General del Dominio Integrador de Actividades.	80
5.10. Flujo Específico del Juego <i>Mirror</i>	83
5.11. Flujo Específico del Juego <i>Memory</i>	85
5.12. Flujo Específico del Juego <i>NaoSays</i>	87
5.13. Modelo de Adaptación al Usuario.	88
5.14. Evolución de los Umbrales de un Paciente.	90
5.15. Contenido de un Fichero XML de Paciente.	92
5.16. Pantalla de Configuración de Sesiones (en fase beta).	95
8.1. Diagrama de Gantt del Proyecto (Vista General).	117
8.2. Diagrama de Gantt del Proyecto (Fase de Planteamiento).	118
8.3. Diagrama de Gantt del Proyecto (Fase de Análisis).	118
8.4. Diagrama de Gantt del Proyecto (Fase de Diseño e Implementación).	119
8.5. Diagrama de Gantt del Proyecto (Tarea de Reconocimiento de Poses).	119
8.6. Diagrama de Gantt del Proyecto (Tarea de Planificación de Sesiones).	120
8.7. Diagrama de Gantt del Proyecto (Tarea de Adaptación al Usuario).	120
8.8. Diagrama de Gantt del Proyecto (Fase de Experimentación).	121
8.9. Mercado de Referencia Aplicable a NaoTherapist.	126
I.1. NAO Robot.	151
II.1. Catálogo de Poses (parte 1).	164
II.2. Catálogo de Poses (parte 2).	165

Índice de tablas

4.1. Cuadro Resumen de las Mejoras Analizadas.	40
4.2. Escenario del Sistema E-V01.	42
4.3. Escenario del Sistema E-V02.	43
4.4. Escenario del Sistema E-V03.	44
4.5. Escenario del Sistema E-P01.	45
4.6. Escenario del Sistema E-P02.	46
4.7. Escenario del Sistema E-P03.	47
4.8. Escenario del Sistema E-P04.	48
4.9. Escenario de Uso del Sistema E-P05.	49
4.10. Escenario de Uso del Sistema E-U01.	50
4.11. Escenario de Uso del Sistema E-U02.	51
4.12. Diagrama de Casos de Uso DCU-01.	53
4.13. Diagrama de Casos de Uso DCU-02.	54
4.14. Diagrama de Casos de Uso DCU-03.	55
4.15. Requisito del Sistema R-V01.	57
4.16. Requisito del Sistema R-V02.	57
4.17. Requisito del Sistema R-V03.	57
4.18. Requisito del Sistema R-V04.	58
4.19. Requisito del Sistema R-V05.	58
4.20. Requisito del Sistema R-V06.	58
4.21. Requisito del Sistema R-V07.	59

4.22. Requisito del Sistema R-V08.	59
4.23. Requisito del Sistema R-V09.	59
4.24. Requisito del Sistema R-V10.	60
4.25. Requisito del Sistema R-V11.	60
4.26. Requisito del Sistema R-V12.	60
4.27. Requisito del Sistema R-P01.	60
4.28. Requisito del Sistema R-P02.	61
4.29. Requisito del Sistema R-P03.	61
4.30. Requisito del Sistema R-P04.	61
4.31. Requisito del Sistema R-P05.	62
4.32. Requisito del Sistema R-P06.	62
4.33. Requisito del Sistema R-P07.	62
4.34. Requisito del Sistema R-P08.	62
4.35. Requisito del Sistema R-P09.	63
4.36. Requisito del Sistema R-U01.	63
4.37. Requisito del Sistema R-U02.	63
6.1. Resultados del Dominio Antiguo vs Nuevo	99
6.2. Resultados del Problema Mixto.	100
6.3. Paciente Ejercitándose con NaoTherapist	103
6.4. Pacientes del Campamento de Terapia Intensiva	104
6.5. Resultados de la Evaluación en el Campamento	105
6.6. NAO con los Pacientes Andrea y Mario	106
8.1. Resumen del Presupuesto del Proyecto.	122
8.2. Presupuesto de Hardware del Proyecto.	123
8.3. Presupuesto de Software del Proyecto.	123
8.4. Presupuesto de Otros Aprovevisionamientos del Proyecto.	124
8.5. Presupuesto de Recursos Humanos del Proyecto.	124
III.1.Evolución del Paciente pt01 (parte 1)	168

III.2.Evolución del Paciente pt01 (parte 2)	169
III.3.Evolución del Paciente pt02 (parte 1)	170
III.4.Evolución del Paciente pt02 (parte 2)	171
III.5.Evolución del Paciente pt03 (parte 1)	172
III.6.Evolución del Paciente pt03 (parte 2)	173
III.7.Evolución del Paciente pt04 (parte 1)	174
III.8.Evolución del Paciente pt04 (parte 2)	175
III.9.Evolución del Paciente pt05 (parte 1)	176
III.10Evolución del Paciente pt05 (parte 2)	177
III.11Evolución del Paciente pt06 (parte 1)	178
III.12Evolución del Paciente pt06 (parte 2)	179
III.13Evolución del Paciente pt07 (parte 1)	180
III.14Evolución del Paciente pt07 (parte 2)	181
III.15Evolución del Paciente pt08 (parte 1)	182
III.16Evolución del Paciente pt08 (parte 2)	183
III.17Evolución del Paciente pt09 (parte 1)	184
III.18Evolución del Paciente pt09 (parte 2)	185
III.19Evolución del Paciente pt10 (parte 1)	186
III.20Evolución del Paciente pt10 (parte 2)	187

Capítulo 1

Introducción

La Robótica Social es una rama del campo de la Ingeniería Social que actualmente se encuentra en pleno crecimiento, centrándose en la utilización de robots para intentar cubrir diferentes necesidades sociales. Se trata de un campo interdisciplinar, ya que combina aspectos sociales de Psicología con tecnología derivada de la Informática. Así pues, en el término de Robótica Social se incluyen a todas aquellas plataformas robóticas que proveen un servicio o asistencia a personas de forma interactiva [Feil-Seifer and Mataric, 2005]. Recientemente, en la última década, se ha trabajado en el desarrollo de sistemas que acabaron dando muy buenos resultados, lo cual permitió, a posteriori, abrir nuevas líneas de investigación dedicadas específicamente al dominio de la rehabilitación terapéutica, tanto física como cognitiva. De esta manera, surgieron estudios punteros sobre la demencia en ancianos, el autismo, la deficiencia motriz o la parálisis cerebral, los cuales demostraron que con el uso de plataformas robóticas se consigue un mayor compromiso del paciente con la terapia [Feil-Seifer and Mataric, 2011].

Por tanto, el mayor reto recae sobre la necesidad de desarrollar plataformas o sistemas que no solo ofrezcan un soporte a los terapeutas profesionales, sino que también garanticen una mayor evolución del paciente durante la rehabilitación. Esta combinación de objetivos permitiría reducir drásticamente tanto el coste de las sesiones de terapia como el esfuerzo que supone para los terapeutas. Siguiendo con la necesidad de captar la atención de pacientes y terapeutas, otra cuestión importante reside en la elección del diseño, la apariencia, la capacidad de interacción y la autonomía del robot. Todos estos elementos a tener en cuenta hacen que el proceso de desarrollo de estas plataformas sociales sea más lento y complejo de lo normal [Tapus et al., 2007].

El presente trabajo se sitúa en el marco de la rehabilitación infantil de pacientes con deficiencia motriz en las extremidades superiores producida por un daño cerebral o nervioso. El objetivo es continuar con el desarrollo de la plataforma NaoTherapist, una arquitectura que permite controlar un robot humanoide para que lleve a cabo las sesiones de rehabilitación adoptando el rol del terapeuta y ofrece soporte al médico especialista para evaluar la evolución del paciente [Pulido et al., 2017]. El objetivo de este desarrollo continuista del proyecto es actualizar algunos aspectos de la arquitectura y adaptar la plataforma inicial para que su uso encaje perfectamente en el transcurso normal de un campamento de terapia bimanual intensiva. Así, se intentará seguir cubriendo las necesidades y problemas encontrados durante la fase inicial del proyecto [Suárez Mejías et al., 2013], donde la plataforma robótica ejecutaba una secuencia de ejercicios preprogramados, además de nuevas necesidades halladas mediante conversaciones con los terapeutas profesionales organizadores de dicho campamento. Por tanto, este trabajo entra en la tercera fase de investigación del proyecto antes llamado Therapist [Calderita et al., 2013], y ahora denominado NaoTherapist [González et al., 2017]. Así, se pretende dar al robot de la suficiente autonomía como para planificar las sesiones de terapia intensiva y reaccionar ante situaciones inesperadas. Al mismo tiempo debe garantizar que el paciente cumple con los objetivos terapéuticos establecidos por los especialistas, participando estos activamente en el diseño previo de las sesiones. Además, se quieren diseñar nuevas actividades terapéuticas para permitir el uso de la plataforma en terapias intensivas de forma que las sesiones no se hagan demasiado repetitivas, y trabajar en un nuevo modelo de adaptación a los usuarios o pacientes que realicen las sesiones de rehabilitación.

A continuación, se seguirá con el resto de la introducción, estructurada de la siguiente manera. El punto 1.1 describe en mayor medida en qué consiste el campamento de terapia intensiva y las afecciones y características de los pacientes beneficiarios de esta terapia, planteando así el problema afrontado. La sección 1.2 explica la importancia y los beneficios de resolver el problema planteado anteriormente. El apartado 1.3 presenta la propuesta y objetivos concretos de este trabajo. Y por último 1.4, donde se detalla la estructura del presente documento tras la introducción inicial.

1.1. Planteamiento del Problema

NaoTherapist es un proyecto derivado del proyecto Therapist¹ del Plan Nacional de Investigación (TIN2012-38079) en el que trabajaban conjuntamente varios grupos de investigación de diferentes universidades españolas: el grupo de Ingeniería de Sistemas Integrados de la Universidad de Málaga, el laboratorio de robótica de la Universidad de Extremadura, Multimedia & Multimodal Processing de la Universidad de Jaén y el grupo de Planificación y Aprendizaje de la Universidad Carlos III de Madrid. Además, este proyecto contaba con el apoyo de un grupo experto de rehabilitadores y terapeutas del Hospital Universitario Virgen del Rocío de Sevilla (HUVR), los cuales ofrecían soporte clínico durante el desarrollo del trabajo y posibilitaron una evaluación inicial de la plataforma robótica con pacientes de la unidad de rehabilitación pediátrica.

Entonces, tras finalizar el desarrollo de Therapist, surge el proyecto NaoTherapist, propiedad de la Universidad Carlos III de Madrid. Como diferencias relevantes, se emplea un robot humanoide en lugar de un robot con apariencia de oso, y se le da una mayor autonomía a la plataforma robótica, intentando evitar una mayor participación del terapeuta y del ingeniero experto durante la sesión, para mejorar la interacción con el usuario [Pulido et al., 2014].

Aunque esta herramienta terapéutica ya había sido evaluada con 8 pacientes reales en una evaluación a largo plazo en el Hospital Universitario Virgen del Rocío de Sevilla [Pulido et al., 2017]. El sistema también fue invitado recientemente a participar en un campamento de terapia intensiva llamado HABIT (Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy), creado en la Universidad de Columbia [Charles and Gordon, 2006] y organizado por primera vez en España por la fundación DACER² y la Universidad Europea de Madrid. Debido a las características especiales de este tipo de terapia, las cuales veremos más tarde (1.3), se puede observar la necesidad de adaptar la arquitectura actual a un ambiente de terapia intensiva, en el que haya una mayor diversidad de actividades dado el poco espacio de tiempo entre una sesión y otra (1 día) y una mayor adaptación autónoma al usuario por la diversidad de los pacientes, con diferentes grados de afección. HABIT se realiza en forma de campamento de 20 días, con la participación de pacientes con edades comprendidas entre los 5 y 13 años, todos ellos con alteraciones motoras en las extremidades superiores producidas por Parálisis Braquial Obstétrica o Parálisis Cerebral. A continuación, se ofrece información sobre ambas enfermedades.

¹<http://www.therapist.uma.es> - Ultimo acceso el 08/08/2017

²<http://www.dacer.org/fd-campamento> - Ultimo acceso el 09/08/2017

Parálisis Braquial Obstétrica (PBO) es una "debilidad o pérdida de movimiento de las extremidades superiores producida cuando el conjunto de nervios alrededor del hombro son dañados durante el parto" [Gilbert and Whitaker, 1991]. Tal y como puede observarse en la figura 1.1, este grupo de nervios se denomina Plexo Braquial (*Brachial Plexus*). Esta complicación del parto ha podido reducirse a lo largo de los años gracias a los avances en medicina. A pesar de ello, 1.5 de cada 1000 niños presentan este tipo de lesión al nacer y precisan de rehabilitación física. No obstante, el Plexo Braquial también puede sufrir daños en accidentes de tráfico o infecciones, aunque en cualquier caso se requiere rehabilitación para recuperar la movilidad de las extremidades afectadas, ya sea parcial o totalmente [Chuang et al., 1993].

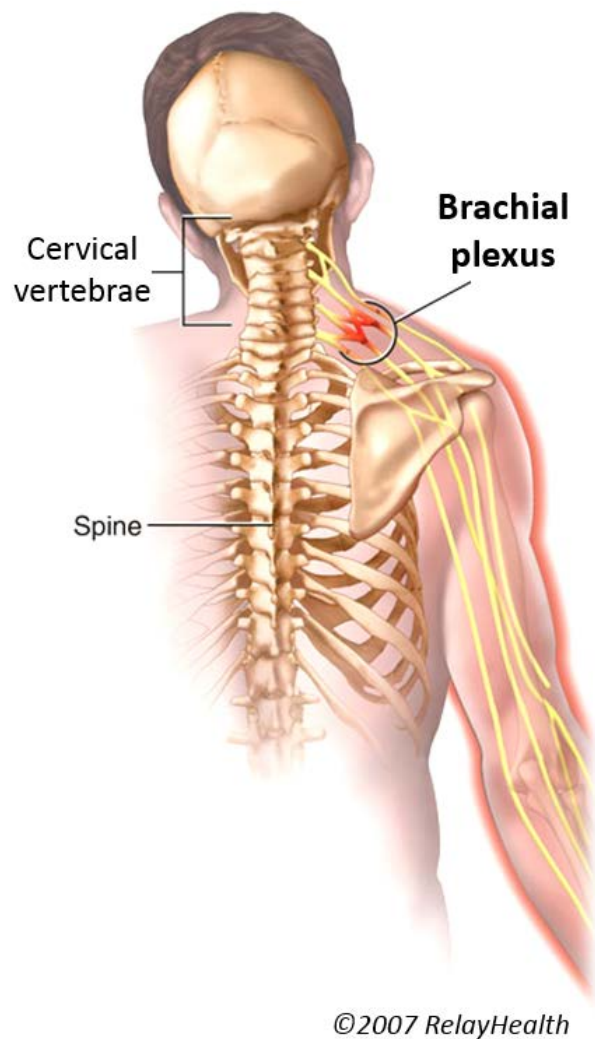


Figura 1.1: Lesión en el Plexo Braquial.

Parálisis Cerebral Infantil (PCI) es el término que enmarca el "grupo de afecciones no progresivas relacionadas generalmente con la incapacidad de controlar completamente las funciones motoras" [Bax et al., 2005] [Krägeloh-Mann and Cans, 2009]. No llega a pertenecer al grupo de Enfermedades Raras, puesto que el 60 % de los niños con deficiencia motora se clasifican bajo el marco de parálisis cerebrales, siendo bastante común en la población. Las causas de estas lesiones en niños suelen producirse por complicaciones durante el embarazo, el parto o la época post-natal; aunque, al igual que la PBO también puede darse por algún tipo de infección o accidente. En total, 3 cada 1000 nacimientos presentan esta sintomatología y está estimado que alrededor de 650.000 familias a nivel europeo tienen a su cargo una persona con parálisis cerebral [Castelli, 2011]. Estos trastornos motrices se relacionan directamente con las extremidades del individuo, tanto superiores como inferiores, limitando los movimientos articulares del paciente.

Ambas afecciones comprometen la autonomía del paciente en tareas cotidianas de la vida diaria tales como vestirse, alimentarse o desplazarse [Dickinson et al., 2007]. Además, por el momento no se conoce ninguna cura, sino que la mejoría de los pacientes debe buscarse a través de la realización terapias de rehabilitación. Así, una terapia bien diseñada y ejecutada permite mejorar diferentes habilidades, como andar o agarrar objetos, reduciendo la rigidez de los músculos y previniendo posibles malformaciones [Reid, 2002]. De ahí, puede sacarse la necesidad de un elemento tanto motivador para los pacientes, los cuales deben sufrir largas y tediosas terapias de rehabilitación, como de apoyo a los terapeutas que les faciliten la ejecución de las terapias y el seguimiento de la evolución de los pacientes.

1.2. Motivación

Cualquier persona que haya sufrido una rehabilitación física intensiva, conoce la frustración, aburrimiento y disconformidad que conllevan los ejercicios repetidos a lo largo de días, semanas o incluso meses. Por esto mismo, para los niños pequeños y sus familias, muchas veces la rehabilitación supone un periodo emocionalmente traumático. Los fisioterapeutas y médicos rehabilitadores que traten con estos niños deben estar altamente cualificados en el arte de la motivación y refuerzo de los niños, pero dicha motivación supone un gran coste en tiempo y recursos. Además, a pesar de sus esfuerzos, en este aspecto no se obtienen buenos resultados en todas las sesiones. En este sentido, como ya se ha expuesto antes, la calidad de la terapia y el compromiso del paciente pasan a ser factores claves en el éxito de una terapia de rehabilitación.

Para solucionar esto, con el proyecto NaoTherapist se propone el uso de las nuevas tecnologías en estas sesiones de rehabilitación. Concretamente, se apuesta por el desarrollo de una plataforma tecnológica, en la que se integra un robot humanoide llamado “NAO”, un candidato ideal para que los pacientes colaboren y estén motivados durante la rehabilitación. Sin embargo, la rehabilitación requiere más que la atención de un niño, sino también el cumplimiento continuo de las instrucciones del terapeuta y la motivación suficiente para que el niño persevere. Así, la plataforma debe estar desarrollada debidamente para que cumpla tres nuevos roles, de acuerdo a las necesidades de un asistente terapéutico: el motivador, el demostrador y el instructor.



Figura 1.2: Robot NAO.

Los usuarios típicos de esta herramienta son niños, los cuales requieren una mayor atención por parte de los terapeutas para evitar distracciones y así poder aprovechar al máximo el tiempo del que disponen para cada sesión. Al mismo tiempo, las terapias suelen ser largas y consistir únicamente en repetir ciertos movimientos. Esto resulta tan rutinario que fácilmente puede conducir a una pérdida de interés por parte del paciente, repercutiendo en los resultados de la terapia. Para intentar solventar esto, los terapeutas tienen que invertir mucho tiempo de la sesión en la motivación del niño, aunque no siempre se consigue el efecto deseado, lo cual hace que no se alcancen los objetivos deseados [Calderita et al., 2013]. Todo ello gana una mayor importancia, si cabe, en una terapia intensiva, puesto que los pacientes acuden a las sesiones de terapia un día tras otro durante un determinado periodo de tiempo, debiendo proporcionarles elementos motivadores e innovadores. De esta forma, NaoTherapist cumple el **rol motivador** como un elemento innovador en las terapias de rehabilitación. Nao debe poder proporcionar palabras de ánimo y aliento, lo que se puede conseguir, en parte, con promesas de recompensas por el trabajo bien hecho como bailes, música y cuentos. Otra opción interesante es incluir frases personalizadas de ánimo con el nombre del paciente, y basadas en sus propios intereses. Luego, con el fin de no perder su motivación y atención, deben incluirse una gran variedad de juegos o ejercicios de rehabilitación.

Por otro lado, tenemos los dos roles que cumplen una función más práctica dentro de las sesiones de terapia. Primero, el **rol demostrador**. En este rol, el robot introduce y describe cada ejercicio de la sesión, antes de realizar el movimiento delante del niño. Cuando termina, se invita al paciente a realizar esta vez el ejercicio juntos. El último es el **rol instructor**, guiando al niño a través de una serie de actividades en forma de juego. La plataforma sigue atentamente los movimientos del paciente con la ayuda de un sensor 3D (Kinect v2), proporcionando “feedback” concreto sobre la corrección del movimiento, con el fin de ayudarle en su control postural, y reaccionando a los diferentes hitos que se van consiguiendo con gestos y palabras de ánimo. Con este análisis “kinemático” realizado a los pacientes, además, se pueden generar informes clínicos sobre el estado y la evolución de los pacientes. Estos dos roles suponen otro gran beneficio para los terapeutas, puesto que con ello se liberan de cierta carga de trabajo, evitando tener que desarrollar ellos mismos toda la sesión y dedicándose únicamente al diseño y supervisión de la terapia.

Como puede verse, los beneficios aportados por la robótica a este tipo de actividades de rehabilitación resultan bastante significativos. En resumen, se consigue descargar el trabajo del terapeuta con la participación activa de los robots en las sesiones de rehabilitación. Además, se puede proveer una herramienta que facilita en gran medida la supervisión y monitorización de las sesiones de terapia [Matarić et al., 2007]. Con ello, se inicia toda una línea de investigación alrededor del estudio de los beneficios de usar este tipo de técnicas [Družbicki et al., 2013] [Ros et al., 2011] [Borggraefe et al., 2010], incluso llegando a proponer nuevos modelos de comportamiento con el objetivo de mejorar la interacción del robot con los pacientes [Nalin et al., 2012].

Por tanto, este trabajo se sostiene bajo la hipótesis de que los pacientes se comprometerán en mayor medida con terapias de rehabilitación dirigidas por robots sociales, algo muy necesario en las terapias de rehabilitación intensivas. Esto permite investigar en el diseño de nuevos tipos de terapias o actividades basadas en el uso de robots, concretamente de la plataforma NaoTherapist, que ayudarán a la recuperación del paciente y reducirán los costes socio-económicos. También se tienen en cuenta las necesidades de los propios terapeutas, intentando hacer más fácil su trabajo diario con una herramienta de apoyo tanto en el desarrollo de las terapias como en la monitorización de los pacientes.

1.3. Objetivos del Trabajo

Con el fin de poder comprender los objetivos, primero es recomendable describir la organización y objetivos del campamento HABIT en España, motivo principal de este trabajo, y cómo se desarrolla una sesión típica de rehabilitación con el robot dentro del mismo, según las indicaciones de la coordinadora del campamento.

El objetivo de HABIT es ayudar a los niños a mejorar la destreza y la coordinación de ambos brazos en actividades cotidianas [Charles and Gordon, 2006]. Su éxito reside en la aplicación de una terapia intensiva diaria, basada en algunos conceptos clave como la repetición de movimientos con variabilidad de los ejercicios [Magill and Hall, 1990], el incremento progresivo de la complejidad, la motivación [Kleim, 2008], y el refuerzo positivo [Schmidt, 1988]. Estos conceptos representan, en definitiva, las necesidades de los pacientes infantiles en su proceso de rehabilitación. Así pues, durante el transcurso del campamento, los niños deben realizar multitud de actividades terapéuticas, ocultas bajo un ambiente distendido de juego. Estas actividades, a su vez, deben respetar el tratamiento individualizado, siendo personalizadas según las necesidades de cada paciente, debido a la alta heterogeneidad de los pacientes que suelen participar en el mismo. De esta forma, el coordinador del campamento establece unos objetivos terapéuticos generales basados en el método HABIT, que luego cada terapeuta debe adaptar a las necesidades y diagnóstico clínico del niño que tiene asignado.

En la primera edición de este campamento en España, celebrado en julio de 2017, se optó por incluir sesiones especiales diarias con el sistema NaoTherapist. El fin de incorporar esta plataforma en el campamento era incrementar el tipo de actividades que los niños pudieran realizar en el transcurso del campamento, con un número fijo de sesiones individuales con el robot. Todo ello, en pos de incluir una herramienta de motivación que mejorase la adherencia al campamento. Cada terapeuta debe diseñar previamente cada sesión de la terapia con el robot, adaptando los ejercicios y las poses a realizar a las necesidades de su paciente. Luego, tras poder observar el transcurso de la sesión y la evolución del paciente, el terapeuta puede actualizar las siguientes sesiones ya diseñadas de la terapia o generar nuevas.

Entonces, en las sesiones con el robot en el campamento participan tres actores:

- Coordinador: establece los objetivos generales de terapia en base al método HABIT.
- Terapeuta: adapta los objetivos a las necesidades del niño, y diseña y supervisa las sesiones.
- Paciente: es el usuario o beneficiario directo de la terapia.

En la siguiente figura (1.3) se puede ver gráficamente cómo es todo este proceso.

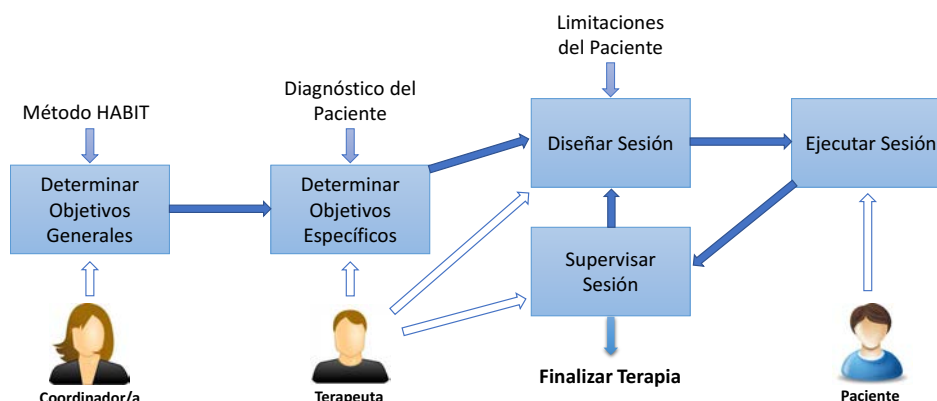


Figura 1.3: Proceso de Terapia con NaoTherapist en HABIT.

El objetivo final de este proyecto es adaptar el sistema y la arquitectura de NaoTherapist a las necesidades de una terapia intensiva, como la desarrollada en los campamentos del método HABIT. Teniendo en cuenta que las sesiones son en días consecutivos, es muy importante diseñar un tipo de interacción robot-paciente que sea capaz de mantener la motivación de los niños durante toda la duración del campamento. Por otra parte, también se pretende liberar al terapeuta de una mayor carga de trabajo, intentando proporcionar una mejor monitorización de los ángulos articulares con la que este más familiarizado y una mayor información sobre la evolución del paciente.

A continuación, se resumen los problemas abordados en este trabajo y la solución propuesta para cada uno con el objetivo de resolverlos:

1. *Problema 1: los terapeutas no poseen una herramienta con la que poder monitorizar en tiempo real los movimientos del paciente, es decir, con la que ver sus limitaciones físicas sin tener que recurrir al contacto físico.*

- Propuesta: desarrollar una herramienta de monitorización que muestre en tiempo real los ángulos articulares del paciente al realizar una determinada pose o movimiento. Se pretende, para ello, generar un nuevo modelo de biomecánica articular dentro de la arquitectura NaoTherapist que esté más familiarizado con los conocimientos de los terapeutas. Luego, se quiere ofrecer una interfaz gráfica con la cual se pueda monitorizar a los pacientes, a la vez que generar nuevas poses para el catálogo disponible en las sesiones a diseñar por los terapeutas.

2. *Problema 2: para una terapia intensiva es necesario tener una interacción muy rica entre robot y paciente, con tal de poder evitar una pérdida de motivación de los pacientes a lo largo del tiempo.*

- Propuesta: diseñar con la ayuda de terapeutas profesionales nuevos tipos de actividades, los cuales luego se integrarán en un nuevo modelo de planificación en lenguaje deliberativa que usa la arquitectura, aumentando así la variabilidad de los ejercicios. Esta integración debe permitir que puedan realizarse varios tipos de ejercicios en una misma sesión de terapia sin entorpecer la interacción con el paciente, por lo que se trabajará en un flujo de ejecución general y en otro específico para cada tipo de ejercicio. Por otro lado, también se modificará este flujo general, procurando conseguir un sistema de recompensas adaptado al rendimiento del paciente durante el ejercicio y la posibilidad de ocultar la terapia con el robot en un ambiente diferente.

3. *Problema 3: actualmente, la arquitectura NaoTherapist no dispone de un sistema de adaptación al usuario con el que fácilmente personalizar tanto la complejidad de los ejercicios como la interacción con el robot a sus necesidades clínicas.*

- Propuesta: trabajar en un nuevo sistema de adaptación al usuario en el cual el reconocimiento de las poses sea más o menos riguroso en función de las limitaciones físicas del propio paciente, repercutiendo esto en la complejidad de la sesión. Además, en este sistema de adaptación, cada usuario tendrá poses y sesiones personalizadas según sus necesidades clínicas. De esta forma, se evita tener que diseñar poses, sesiones o discursos que deban ajustarse a todos los pacientes en conjunto, sino que se podrá mantener la heterogeneidad de las características de cada uno.

1.4. Estructura del Documento

Para finalizar con la introducción del trabajo, se detalla la estructura del presente documento. Tras este capítulo introductorio, primero se encuentra el apartado 2 (Estado de la Cuestión), en el que se describen los campos de investigación involucrados en este proyecto. Aquí se incluyen, por tanto, la robótica social terapéutica, los sistemas de reconocimiento gestual y la planificación, intentando mostrar todos aquellos proyectos que han sido referentes para el desarrollo del propio.

A continuación, en el punto 3 (Contexto de Trabajo) se detallará el estado de la arquitectura NaoTherapist inicial, a partir del cuál se inicia el trabajo, y otros componentes que serán significativos en el proceso de desarrollo, como el sensor Kinect v2 o la arquitectura de planificación automática PELEA.

Seguido de ello, se iniciará la documentación del todo el proceso de desarrollo seguido, en el que se incluyen las fases típicas: análisis, implementación y experimentación. En primer lugar, se tratará el análisis de las nuevas mejoras a incorporar en la arquitectura de NaoTherapist (capítulo 4), mostrando los distintos escenarios, requisitos y casos de uso derivados de las propuestas planteadas anteriormente. Luego, en el capítulo 5 se describirán en detalle los diseños e implementaciones realizados para cada uno de los nuevos componentes realizados: reconocimiento de poses, planificación de sesiones y sistema de adaptación al usuario. Finalizando con las fases de desarrollo, en el apartado 6 se expone la experimentación realizada para evaluar cada componente desarrollado, incluyendo la experiencia obtenida en el propio campamento de terapia bimanual intensiva, mostrando los resultados obtenidos durante la misma.

A continuación, se presentan los capítulos más involucrados con la gestión empresarial o administrativa del proyecto. El primero de ellos es la sección 7 (Marco Regulador), donde se analizan toda aquella legislativa o regulación relacionada con este proyecto, como en este caso es la Ley de Protección de Datos o los certificados clínicos de actividad, entre otros. El siguiente capítulo, 8 (Entorno Socio-Económico del Proyecto), analiza el impacto socio-económico del proyecto, incluyendo además una planificación, un presupuesto detallado y un análisis comercial.

Por último, se muestra un apartado dedicado exclusivamente a las conclusiones obtenidas del proyecto (capítulo 9), además de las pertinentes menciones a planteamientos de futuros trabajos que puedan seguir la misma línea de éste. También se incluye un apartado de referencias bibliográficas en el que se indica toda la documentación empleada para la realización de este trabajo.

Como Anexos, se incluyen un total de cuatro apartados. El Anexo I contiene un pequeño resumen del trabajo en inglés. En segundo lugar, en el Anexo II se muestra el catálogo de poses incluidas en el sistema, disponibles para diseñar las sesiones de rehabilitación. Luego, el Anexo III muestra los datos obtenidos sobre la progresión presentada por los pacientes durante el campamento. Finalmente, el Anexo IV incluye una copia del artículo en el que figura como primer autor el mismo de este trabajo [G. Estévez et al., 2017], al haber sido presentado parte del desarrollo realizado a la Conferencia ROBOT'2017.

Capítulo 2

Estado de la Cuestión

En el presente capítulo se tratará el estado de la cuestión o estado del arte, es decir, el estado último de la investigación en los campos relacionados con este proyecto. De esta forma, primero se comenzará con el apartado 2.1, en el cuál se muestra una panorámica actual de un área de la robótica dedicada exclusivamente a la asistencia social, campo en el que se incluye claramente la idea del proyecto de desarrollar un robot terapeuta autónomo. A continuación, en la sección 2.2 se detallará en qué consiste la Planificación Automática, exponiendo los conceptos básicos necesarios para entender cómo funciona esta técnica o disciplina de la Inteligencia Artificial. En último lugar, en el apartado 2.3, se mostrará información sobre los retos que actualmente supone el reconocimiento de posturas, así como distintas técnicas que han sido empleadas en diferentes investigaciones.

2.1. Robótica Social de Asistencia

La Robótica Social o Robótica de Asistencia Social es una disciplina incluida dentro de la Robótica, la cual se centra en el desarrollo de robots destinados a proporcionar un servicio de apoyo o soporte a personas mediante la interacción con éstas, ya sea de forma física o sin contacto alguno. En los últimos años, esta disciplina de la robótica ha ganado mucha importancia, hasta tal punto de haber un gran auge en las investigaciones dedicadas a esta área. Así, en 2005, Feil-Seifer y Mataric desarrollaron un estudio en el que terminaban por ofrecer una taxonomía de los diversos tipos de robots sociales, en base a la especificación de tres conceptos: características, interacción social y objetivos primarios [Feil-Seifer and Mataric, 2005].

La clasificación propuesta por los dos autores citados anteriormente es la siguiente:

- ***Assistive Robotics (AR)* o Robótica de Asistencia:** este grupo cubre a todos aquellos robots que proporcionan una asistencia directa a personas con algún tipo de discapacidad. Dentro de este tipo de robótica, los exoesqueletos forman la línea de investigación más común y, por tanto, más desarrollada [Nef et al., 2007]. Luego, existen otros muchos sistemas que mejoran en gran medida la movilidad de los pacientes [Dubowsky et al., 2000] [Lacey and Dawson-Howe, 1998]. En la Robótica Social, éste es el grupo que se lleva desarrollando un mayor tiempo, ya que se empezó a trabajar en ello hace ya más de 40 años intentando cubrir las necesidades de movilidad de las personas discapacitadas [Burgar et al., 2000].
- ***Socially Interactive Robotics (SIR)* o Robótica Social Interactiva:** es un término introducido en el año 2003 por Fong [Fong et al., 2003], en el cual se incluye a todos aquellos robots cuyo principal objetivo sea llevar a cabo alguna forma de interacción social con las personas. Un ejemplo de ello pueden ser las plataformas que hacen funciones propias de un mayordomo doméstico [Reiser et al., 2009], o incluso aquellos sistemas destinadas únicamente al entretenimiento de las personas.
- ***Socially Assistive Robotics (SAR)* o Robótica Social Asistiva:** se trata del nuevo término que propusieron los mencionados autores Feil-Seifer y Mataric en el artículo referenciado anteriormente. Simplificando su definición, es la intersección entre las dos categorías anteriores, AR y SIR (ver figura 2.1). Engloba a todas aquellas plataformas robóticas cuyo fin sea proveer un servicio de asistencia, pero a través de la interacción social, sin producirse ningún tipo de contacto físico. Dicho de otro modo, son robots que hacen las funciones de un entrenador, terapeuta o educador, con el propósito de guiar y supervisar a los usuarios durante la sesión para la que están diseñados [Suárez Mejías et al., 2013] [Fasola and Mataric, 2010] [Choe et al., 2013] [Fridin et al., 2011]. Puede deducirse claramente, que ésta es la categoría en la que se encontraría el proyecto NaoTherapist, tratado en este trabajo.

El área de investigación de los SAR es el más reciente. Hoy día, dentro de esta categoría se distingue una gran variedad de plataformas que ejecutan tareas diferentes, de forma diferente y para objetivos diferentes [Mataric et al., 2007]. Por esto mismo, también es necesario establecer una nueva taxonomía dentro de este grupo en función de las características de cada plataforma robótica. Esta división se centrará más en la búsqueda de objetivos comunes que en la sofisticación de la interacción con el humano.

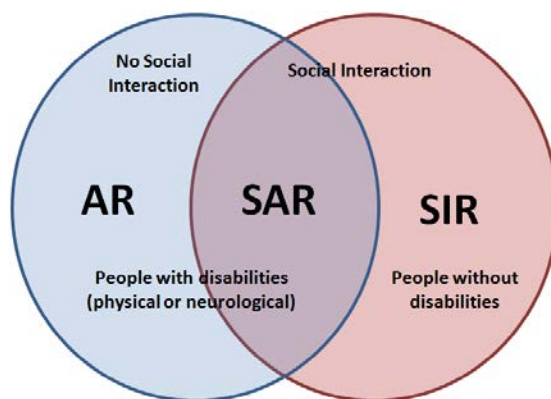


Figura 2.1: Taxonomía de la Robótica Social.

Los usuarios objetivo más comunes en este tipo de robótica social son los ancianos, tanto con problemas físicos como cognitivos. Existen multitud de plataformas que intentan ofrecer un servicio de asistencia a pacientes de demencia [Wada et al., 2005]. Otras necesidades que se suelen intentar cubrir con plataformas robóticas de este tipo son la rehabilitación de parálisis cerebral u otras discapacidades físicas o cognitivas. En todas ellas, el objetivo primordial es mejorar la calidad de vida de los usuarios. Así, estos sistemas pueden agruparse por necesidades o por edad, pero cada caso es completamente distinto, puesto que deben tenerse determinadas consideraciones específicas de su categoría.

Recientemente, se han desarrollado multitud de nuevos sistemas robóticos de asistencia a las terapias de rehabilitación. Como ya se ha mencionado, las plataformas con una mayor tradición y, por lo tanto, mejor desarrollados son los basados en contacto físico, como los exoesqueletos, empleados en adultos con daños medulares para ayudarles a mejorar su capacidad para moverse, llegando incluso a poder subir escaleras [Perry et al., 2007]. No obstante, estos no son muy recomendables para niños, con una estructura ósea mucho más frágil. En cambio, para aquellos casos en que no se pueda forzar físicamente al paciente, existe la tecnología **RMT** (*Robot-Mediated Therapy*); tecnología que trata la implementación de dispositivos adaptables al cuerpo del paciente, los cuales guían las articulaciones durante las terapias de rehabilitación [Castelli, 2011] [Garcia et al., 2011] [Meyer-Heim and van Hedel, 2013]. Por otro lado, también se encuentra la posibilidad de llevar a cabo terapias sin contacto físico, en las cuales se pueden emplear robots sociales autónomos, teleoperados o pre-programados para que guíen las sesiones de rehabilitación. El objetivo de estos robots es estimular la motivación de los pacientes mediante la interacción social, enfocando así el tratamiento a la imitación de movimientos o la ejecución de tareas comandadas por el robot [Matarić et al., 2007]. Además, en muchos otros casos, se utilizan juegos con técnicas de virtualización y realidad aumentada, con las que se mejora el entorno interactivo del paciente, consiguiendo también una mayor motivación [McMurrough et al., 2012].

Intentando abordar los problemas planteados con las terapias sin contacto físico se inició en 2013 el proyecto Therapist. Se desarrolló un robot con forma de oso de 140 cm de altura llamado Ursus (ver Figura 2.2), que cumplimentaba el rol de terapeuta, siendo controlado de forma teleoperada por un experto (técnica de *Wizard of Oz*), en sesiones de rehabilitación para pacientes infantiles con PBO y PCI [Suárez Mejías et al., 2013].

La primera aproximación del proyecto Therapist abordaba este problema de forma básica. Este robot, con un total de cinco grados de libertad en cada brazo, permitían que ejecutara una gran variedad de posturas. Como primer ejercicio de cada sesión de terapia, el paciente debía imitar cada uno de los movimientos que iba mostrando el robot. Este ejercicio se realizaba sobre las extremidades afectadas siguiendo el método de la terapia de restricción inducida [Winstein et al., 2003]. Mientras el niño imitaba las posturas, el sistema capturaba sus movimientos con la ayuda de una cámara RGBD PrimeSense, con el fin de monitorizar sus extremidades. En caso de que el paciente no realizara correctamente las posturas se mostraba cómo corregirlos a través de una simple teleoperación.



Figura 2.2: Robot Ursus.

Siguiendo con la sesión de terapia, en la segunda fase de la misma, el robot proyectaba varios juegos de realidad aumentada que llevaban a la práctica los movimientos que se habían entrenado en el ejercicio anterior. La evaluación cualitativa (entrevistas y cuestionarios) de este sistema con usuarios reales constató que los pacientes se habían divertido durante las sesiones y que la experiencia fue bastante agradable, aumentando su motivación durante la terapia. Varios estudios demuestran que la apariencia del robot empleado influye considerablemente en la percepción y la capacidad para captar la atención del usuario [Stanton et al., 2008]. En este caso concreto, el robot con forma de oso de peluche tenía un aspecto amigable, lo que resultaba bastante atractivo para los pacientes.

Sin embargo, esta plataforma carecía de autonomía completa, requiriendo gente especializada para teleoperar el robot en las correcciones de los movimientos. Esta falta de autonomía se reflejaba en un drástico empobrecimiento de la interacción paciente-robot, reduciendo en ocasiones la atención mostrada por el niño. Procurando solventar estos aspectos negativos del sistema, una de las instituciones integrantes del proyecto, la Universidad Carlos III de Madrid, inició su propio proyecto, bajo el nombre de NAOTherapist. La arquitectura desarrollada en este proyecto se detallará más adelante, en el capítulo 3, como parte del contexto o entorno de trabajo en el que se desarrolla este proyecto.

2.2. Planificación Automática

La Planificación Automática (PA) es una disciplina perteneciente a la Inteligencia Artificial cuyo origen se encuentra en los años setenta, con el objetivo de intentar resolver problemas complejos a través de planes formados por una secuencia de acciones [Ghallab et al., 2004]. Partiendo de un determinado un estado inicial, un algoritmo de planificación debe hallar el conjunto de acciones aplicables al problema que ejecutadas secuencialmente alcancen el estado final objetivo dado, más comúnmente conocido como metas. La principal dificultad que puede encontrarse en estos problemas está en la posible existencia de múltiples metas que interaccionen negativamente entre sí, provocando entonces que la secuencia de acciones necesaria para llegar a la solución de cada una de las metas cambie el estado del problema de tal manera que se generen conflictos con las acciones necesarias para alcanzar otras metas.

Normalmente, cuando se quiere resolver un problema dado con Planificación Automática, se emplea un lenguaje de modelado con el que expresar el conocimiento del problema en un dominio de planificación, incluyendo aquí tanto los predicados que determinan el estado del mundo como las posibles acciones a realizar. A su vez, las acciones del dominio están formadas por precondiciones y efectos. Por otra parte, formando una instanciación del modelo, se encuentran la especificación del estado del mundo inicial y la meta o metas que se pretenden alcanzar, lo cual define un problema concreto a resolver. Tras definir esto, se comienza la elaboración automática del plan. En el momento en que el conjunto de predicados que conforman el estado del mundo cumplen las precondiciones de una o varias acciones, se dice que éstas son aplicables. Luego, al ejecutarse una determinada acción, sus efectos generan cambios en el estado del mundo (adición y supresión de predicados). Así pues, el planificador automático intenta buscar la secuencia de acciones aplicables que permitan ir del estado inicial a las metas indicadas.

Un ejemplo típico de problema de Planificación Automática es el Mundo de los Bloques (ver la figura 2.3). Se trata de un problema en el que un brazo robótico debe realizar una serie de operaciones con los bloques. En el caso presentada en la figura, como estado inicial se establece que el bloque A está sobre el bloque B y como meta o estado final que se desea alcanzar se establece que el bloque B esté encima del bloque A. Las acciones que podrían llevarse a cabo en el problema, y que por tanto deberían modelarse en su dominio, serían: desapilar bloque, levantar bloque de la mesa, apilar bloque y dejar bloque sobre la mesa. Debe tenerse en cuenta que el brazo robótico solo permite coger un bloque al mismo tiempo, tratándose de una restricción que tendría que representarse claramente en el dominio del problema, añadiendo un predicado que representase en el estado del mundo si el brazo se encuentra sujetando un bloque o no. Ejecutando una determinada secuencia de estas acciones (plan), el planificador debe intentar llegar hasta el estado final planteado. La solución de este caso concreto es simple, con el siguiente plan de ac

A.

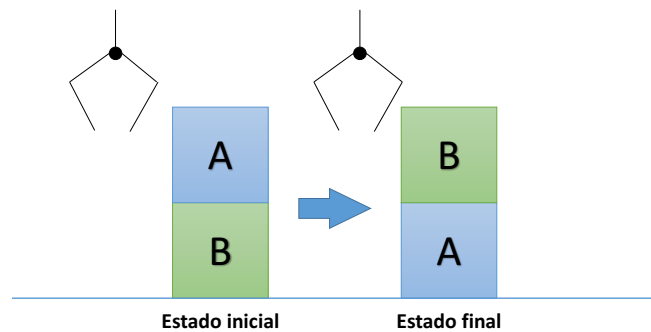


Figura 2.3: Problema del Mundo de los bloques.

Muchas investigaciones se centran en diseñar estrategias y algoritmos de búsqueda con el fin de generar planificadores con la capacidad de resolver cualquier tipo de problema. Este intento de generalización a menudo conlleva una pérdida en la posibilidad de adaptar el comportamiento del planificador al problema que se quiere resolver. Por este motivo, existen diversos planificadores muy dispares. Uno de los planificadores que mejores resultados ha obtenido es *Lama* [Richter et al., 2011], ganador de las competiciones de planificación IPC-2008 e IPC-2011¹. Por otro lado, uno de los planificadores cuyo uso está más extendido es el conocido *Metric-FF* [Hoffmann et al., 2003], debido a que acepta dominios con funciones (*fluents*) y acciones con precondiciones numéricas, ofreciendo así un mayor poder de expresión del conocimiento. Más adelante, en la sección 3.3.1 del capítulo 3 se ofrecerán más detalles de este planificador, ya que fue el escogido para desarrollar el trabajo planteado en este documento, dado su mencionado poder de expresión y al mismo tiempo su facilidad de uso.

¹<http://ipc.icaps-conference.org> - Ultimo acceso el 11/08/2017

Otra aproximación consiste en asociar costes a cada una de las acciones, de forma que el algoritmo de planificación busque el plan generado con un menor coste de entre todas las posibles secuencias de acciones aplicables. Un ejemplo de planificador que emplea esta estrategia es el *Cost-Based Planner (CBP)* [Fuentetaja, 2011]. También existen otras estrategias de planificación basadas en el uso de aprendizaje automático para determinar cuál es el planificador que mejor resuelve un problema, dentro de un conjunto de planificadores, denominado *portfolio*. Como ejemplo de *portfolio* podemos encontrar a *IBaCoP (Instance-Based Configured Portfolio)* [Cenamor et al., 2016], ganador también de la competición de IPC, en el año 2014 (IPC-2014).

Además de disponer de un planificador con el que poder resolver problemas, también es necesario un lenguaje de modelado de problemas de planificación automática. Los lenguajes más usados para la representación de problemas están basados en variables de estado, con las que cada posible estado del mundo es una asignación de valores a dichas variables de estado. De entre estos lenguajes, el más clásico es *STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver)* [Fikes and Nilsson, 1971], creado en 1971 y el cual ahora se encuentra casi en desuso. Otro lenguaje conocido tradicionalmente es *ADL (Action Description Language)*, desarrollado en 1987 como una actualización de STRIPS [Pednault, 1989]. No obstante, el lenguaje de representación más utilizado actualmente es *PDDL (Planning Domain Definition Language)* [Fox and Long, 2003], del cual se darán en el apartado 3.3.2 más detalles como parte del contexto de trabajo.

Respecto a los tipos de problemas de planificación, existen varias categorías, todas ellas con sus características propias [Ghallab et al., 2004]:

- **Clásico:** tipo de problema más simple, compuesto por un único estado inicial con un solo agente que realiza acciones deterministas, sin duración temporal y solo ejecutables secuencialmente de una en una. Debido a esto, puede determinarse de modo preciso el estado del mundo después de cada secuencia de acciones.
- **Proceso de Decisión de Markov (MDP):** problemas de una mayor complejidad caracterizados por poder generar resultados parcialmente aleatorios, puesto que los agentes pueden realizar acciones no deterministas. La observabilidad también es completa y se hace uso de funciones de recompensa que deben ser maximizadas.
- **MDP Parcialmente Observable:** similar a un problema resoluble por MDP, con la diferencia de que el agente no puede observar directamente el estado subyacente, teniendo únicamente una distribución de probabilidad sobre el conjunto de posibles estados, basados en un conjunto de observaciones y sus probabilidades calculadas.

- **Planificación Multi-Agente:** en estos problemas, varios agente cooperan entre sí para obtener una solución, lo que implica la coordinación de los recursos y las acciones de los mismos. Por ello, la comunicación entre agentes pasa a ser indispensable, pudiendo tener estos objetivos comunes o contrapuestos.

2.3. Sistemas de Reconocimiento de Posturas

El estudio desde el punto de vista clínico del movimiento humano se remonta a la Edad Antigua, donde ya entonces se intentaba identificar anomalías en el sistema neuromuscular y óseo. Este estudio científico del movimiento humano es denominado Kinesiología ('kinèsis' - movimiento, 'logos' - estudio) [Rojo Castro, 2008]. Este campo de estudio se divide en tres áreas: biomecánica, anatomía musculoesquelética y fisiología muscular. Así pues, la kinesiología trata la compensación de las tensiones mecánicas del organismo humano, intentando detectar malas distribuciones de éstas en el cuerpo, las cuales pueden generar graves lesiones motoras. Al mismo tiempo, existe otra rama de la kinesiología relacionada con la psicología, por la cual gracias al estudio de comportamientos y posturas del ser humano pueden llegar a deducirse su estado de ánimo, siendo esto conocido comúnmente como lenguaje corporal.

Por estos motivos, el reconocimiento automático de posturas y gestos resulta ser un campo de investigación muy trabajado hoy día [Mitra and Acharya, 2007]. Todos los sistemas que intentar llevar a cabo este proceso requieren el uso de una cámara o sensor que capture la información del individuo a analizar (ver figura 2.4). Recientemente, estos sensores se han desarrollado drásticamente, con mejoras tanto en términos de la calidad de la información captada, siendo más resistentes a entornos que generen ruido en los datos, como en la inclusión de nuevas funcionalidades, como la captura de la profundidad entre otras [Foix et al., 2011].



Figura 2.4: Sensores de Movimiento.

Tal ha sido la evolución que ahora algunos dispositivos, como el sensor Kinect, además de proporcionar información de profundidad, ofrece un conjunto de librerías mediante las que se forma un esqueleto de 25 puntos relativos a las articulaciones del individuo identificado. Además, este modelo es tan ligero a la hora de computar que posibilita la captura de datos y reconocimiento de posturas en tiempo real.

Motivadas por estas características, su bajo coste y su facilidad de uso, este sensor se emplea habitualmente en investigaciones relacionadas con la inteligencia artificial. En el capítulo 3, sección 3.2, se darán más detalles acerca de este sofisticado sensor, puesto que la segunda versión de éste fue el escogido para realizar el proyecto planteado, intentando actualizar la arquitectura que usaba la primera versión por los motivos mencionados.

Relacionando el reconocimiento de posturas con lo visto sobre la robótica social, este campo es esencial en la interacción entre humano y robot, lo cual a su vez es un punto primordial en el desarrollo de las plataformas robóticas de asistencia. De esta manera, el uso de técnicas de inteligencia artificial puede ayudar a proporcionar un reconocimiento automático, de forma que se evite la teleoperación y se consiga una mayor autonomía del robot, mejorando así en gran medida la calidad de la interacción durante las sesiones de terapia.

Una línea de investigación en el reconocimiento de posturas consiste en el aprendizaje por parte del robot, de forma similar a cómo lo hacen los seres humanos, recordando qué puede ser una postura y qué puede significar un determinado gesto en base a lo observado previamente, la experiencia. En esta dirección se encuentra el siguiente proyecto: [Gonzalez-Pacheco et al., 2013]; en el cual una plataforma robótica equipada con un sensor Kinect y un módulo de reconocimiento de voz es plenamente capaz de reconocer diferentes posturas. En este sistema, un humano puede enseñar una postura al robot y decirle por comandos de voz cómo etiquetarla, para luego, a partir de información RGB-D (colores y profundidad) sobre cada postura y su etiqueta proporcionada, aprender un modelo de reconocimiento basado en atributo-valor con la ayuda de la herramienta de aprendizaje automático WEKA [Hall et al., 2009]. Más tarde, en base al modelo aprendido, el robot puede clasificar cualquiera postura enseñada y transmitir el resultado por voz al usuario. Así, el sistema es capaz de distinguir casi perfectamente entre tres posturas distintas de las siguientes configuraciones: 1) girado a la izquierda, derecha o de frente, 2) mirando a la izquierda, derecha o de frente, 3) señalando a la izquierda, derecha o de frente. Con un entrenamiento de 150 ejemplos, la plataforma anterior obtiene unos resultados de precisión de entre el 99 % y el 73 % según la configuración. Los resultados obtenidos son bastante buenos.

No obstante, este sistema de aprendizaje requiere 150 ejemplos para clasificar entre tres clases diferentes. Si se extendiera el número de clases o se juntasen las configuraciones, el número de ejemplos debería ser mucho mayor. Por tanto, al intentar desarrollar un sistema que no tenga ningún conocimiento inicial sobre las posturas esto no es válido, ya que los usuarios tendrían que generar un gran conjunto de ejemplos antes de que la herramienta pudiera llegar a funcionar aceptablemente. Entonces, en caso de que se quiera obtener un sistema con reconocimiento casi inmediato de posturas, es normal querer intentar explorar otras alternativas de reconocimiento que empleen poca cantidad de ejemplos para clasificar o incluso que no lleguen a utilizar modelos de aprendizaje.

Por otro lado, existen investigaciones más centradas en garantizar la seguridad de los usuarios, normalmente para su uso con robots industriales. Estas plataformas robóticas industriales, en la interacción con personas, a menudo necesitan tener siempre construido un modelo corporal en 3D del individuo con el que interactúan, incluso cuando no se puede observar todo el cuerpo del mismo, teniendo que estimar la parte no visible. Esta estimación del cuerpo humano se realiza con los datos proporcionados por cámaras que captan los pulsos de luz emitidos por los objetos y una imagen de profundidad [Graf et al., 2010]. Luego, estos datos se analizan para reconocer la postura y situación del usuario, intentando así predecir la acción o acciones que va a realizar. Un ejemplo de esto se puede encontrar en la interacción de personas con brazos robóticos industriales, en la que los mismos robots están continuamente evaluando la peligrosidad de las acciones que está llevando el ser humano que lo utiliza, actuando en caso de haber un posible daño para la salud [Puls et al., 2012].

Capítulo 3

Contexto de Trabajo

Siguiendo la línea mostrada durante el capítulo anterior referente al Estado de la Cuestión, en esta sección se detallará todo el contexto o entorno de trabajo del proyecto tratado. Dicho de otro modo, se expondrán diferentes herramientas sobre los cuales se ha trabajado o que han sido utilizados para intentar desarrollar el proyecto de la mejor forma posible. Así, de forma previa a la exposición del proceso de desarrollo, podrá darse a conocer toda la base del trabajo realizado.

En primer lugar, en el apartado 3.1 se incluye una descripción detallada del estado inicial de la arquitectura NaoTherapist, antes de haber comenzado con el desarrollo que planteado en este documento, con el objetivo de entender cuáles eran los cambios y mejoras necesarios de cara al campamento de terapia intensiva. A continuación, la sección 3.2 muestra información sobre el dispositivo *Microsoft Kinect v2*, una herramienta que se actualiza en este trabajo respecto a la primera versión de la arquitectura NaoTherapist. Además, este sensor es una parte importante del proyecto, puesto que con su ayuda se consigue realizar el reconocimiento postural. Por último, se dedica un apartado (3.3) a PELEA, la arquitectura empleada para desarrollar la planificación automática de las sesiones de terapia y su posterior ejecución o realización, siendo pues otro componente de vital importancia en este proyecto.

3.1. Arquitectura NaoTherapist

El objetivo de este trabajo consiste principalmente en adaptar la plataforma NaoTherapist, ampliando y mejorando sus características, a las necesidades especiales requeridas para su uso en un campamento de terapia intensiva, con el fin de conseguir la participación de esta plataforma en el primer campamento que sigue la metodología HABIT organizado en España. Aunque esta herramienta robótica esté ya diseñada para llevar cabo sesiones de rehabilitación pediátrica con pacientes con discapacidades físicas y su funcionamiento haya sido también ya evaluado, su participación en terapias de carácter intensivo requiere el diseño de nuevas funcionalidades y la implementación de diversas mejoras que agilicen la interacción con los pacientes. Por ello, este trabajo consiste sobre todo en una importante actualización de un producto, por lo que es importante conocer el sistema inicial.

NaoTherapist es una arquitectura robótica que otorga a un robot NAO la capacidad de guiar autónomamente sesiones de rehabilitación interactivas. En estas sesiones, el robot realiza un conjunto de poses definidas previamente, las cuales luego el paciente debe imitar correctamente [Pulido et al., 2016]. Para conseguir esto, el robot se apoya en el uso de un sensor de movimiento llamado Kinect, el cual facilita el chequeo de la pose del paciente y la reacción a la misma, corrigiendo al paciente si es necesario. Entonces, el principal objetivo del sistema NaoTherapist es proveer un robot social con suficiente autonomía como para guiar sin contacto físico a los niños en una sesión típica de rehabilitación terapéutica, procurando aumentar su motivación y atención durante la terapia.

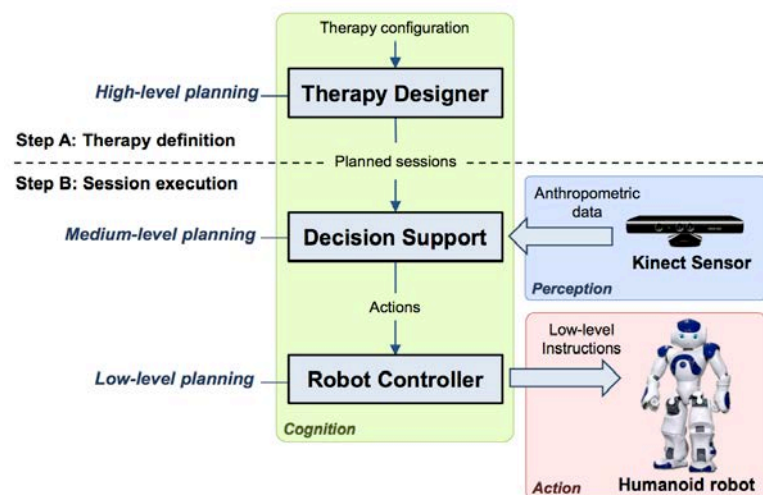


Figura 3.1: Niveles de Planificación en NaoTherapist.

Para alcanzar dicho objetivo, el sistema es controlado por una arquitectura cognitiva que permite la generación de una interacción fluida entre paciente y robot. Esta arquitectura se compone de tres niveles de Planificación Automática [González et al., 2017] (ver figura 3.1):

- **Alto Nivel - Diseñador de Terapias:** este nivel de la arquitectura se encarga de definir o actualizar la configuración de una terapia de un determinado paciente, lo cual tiene lugar antes de la ejecución de las sesiones. El terapeuta dispone de una interfaz gráfica gracias a la cual puede configurar cada sesión de la terapia. A partir de la configuración introducida, el diseñador de terapias se encarga de transformar esta información en predicados que representan el estado del mundo del problema para generar el fichero PDDL del mismo, siendo en este caso un problema del dominio de planificación una única sesión de terapia. En este nivel, también se incluye la posible adición de nuevas poses a la base de conocimiento, almacenadas en un único fichero XML. No obstante, no se dispone de una interfaz con la que añadir nuevas poses fácilmente.

- **Nivel Medio - Sistema de Control (*Decision Support*):** en el nivel medio se incluye un sistema de control encargado de decidir qué acciones debe ejecutar el robot a medida que va avanzando la sesión, controlando continuamente que los efectos percibidos del estado del mundo coinciden con los esperados en cada momento. Es en este nivel donde se hace uso del sensor de movimiento, el cual envía la información recogida del paciente para que luego el sistema de control pueda decidir si la pose puesta por el paciente es correcta según lo esperado. En caso de no ser correcta, se produce una incoherencia entre el estado percibido y el esperado, por lo que se necesita una replanificación de la sesión de acuerdo al nuevo estado del mundo, de la cual también se encarga este sistema.

- **Bajo Nivel - Controlador del Robot:** por último, en el nivel más bajo se lleva a cabo la planificación necesaria para mover el robot de acuerdo a la acción proporcionada por el sistema de control. Por tanto, aquí tiene lugar una traducción de las acciones de medio nivel planificadas anteriormente en acciones de bajo nivel que pueden ser ejecutadas directamente por el robot. Poniendo un ejemplo práctico, si el sistema de control detecta que el paciente ha realizado incorrectamente una pose se lleva a cabo una replanificación de la sesión, la cual indica que la siguiente acción es corregir la postura del paciente; luego, esta acción de corrección se transforma en varias acciones de bajo nivel específicas del robot NAO como decir una frase, mover el cuerpo a la posición del paciente, decir otra frase y mover el cuerpo a la pose correcta, en ese mismo orden.

Por supuesto, estas tres fases presentes en la planificación de las sesiones de rehabilitación se desarrollan gracias a la interacción entre varios componentes desarrollados individualmente, todos ellos basados en el framework de *RoboComp* [Manso et al., 2010]. La comunicación entre los componentes se establece mediante TCP/IP usando ICE (*Internet Communication Engine*), lo que hace a las comunicaciones independientes del lenguaje empleado para programar cada componente.

De esta manera, tal y como puede verse en la figura 3.2, existe un total de 5 componentes y 2 interfaces. *User Interface* y *Therapy Designer* corresponden al alto nivel, donde se configuran y definen las sesiones de terapia. Por otra parte, los componentes *Vision*, *Decision Support* y *Executive* se encargan de manejar la sesión con las acciones planificadas, a la vez que se supervisa la correcta ejecución de las acciones de acuerdo a sus efectos esperados. Estos tres componentes se apoyan en las interfaces proporcionadas por el sensor Kinect y el robot NAO. Por último, se encuentra un componente más, *Dialog System*, el cuál está todavía en fase de desarrollo y con el que se pretende enriquecer la interacción con los pacientes dándole al sistema la capacidad de establecer conversaciones con los usuarios.

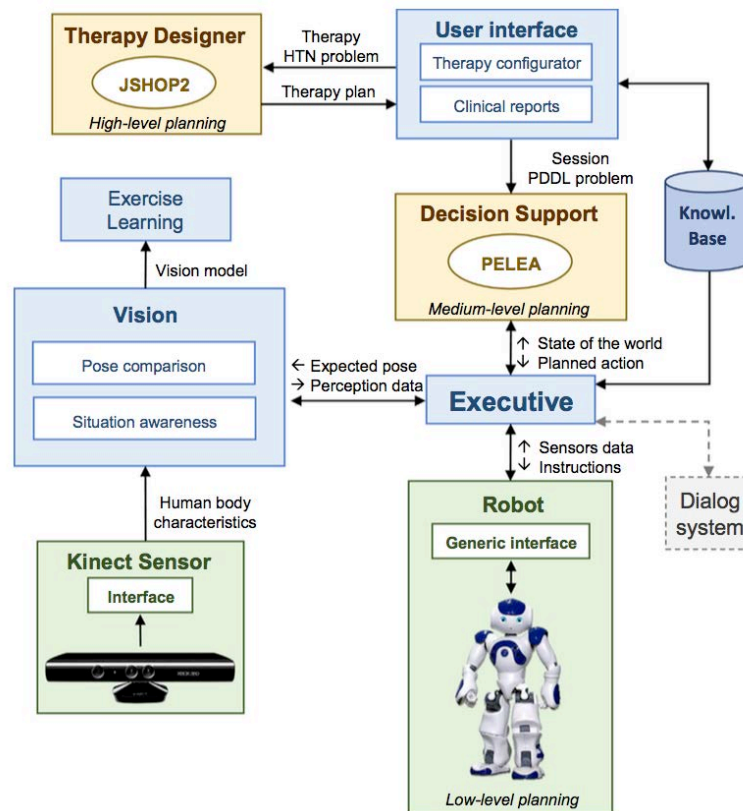


Figura 3.2: Arquitectura de la Plataforma NaoTherapist.

3.2. Sensor de Movimiento Kinect v2

El sensor Kinect fue lanzado al mercado por Microsoft en 2010, siendo una creación de Alex Kipman como parte del proyecto Natal [Zhang, 2012]. En principio, surgió como un accesorio para la consola XBox 360, aunque más tarde, dadas todas las funcionalidades que ofrecía, se desarrolló un SDK (Software Development Kit) con el que poder utilizar la Kinect en un ordenador. Este movimiento por parte de Microsoft hizo que su sensor de movimiento fuera empleado en muchos proyectos de investigación, por las grandes posibilidades de uso que tenía.

Se trata de un dispositivo con un conjunto de sensores y una cámara 3D cuyo uso principal consiste en permitir que los usuarios puedan interactuar con un sistema informático mediante gestos y movimientos de su propio cuerpo. La tecnología empleada para su desarrollo fue creada por la empresa PrimeSense, especialista en interfaces naturales de usuario, mientras que el software lo implementó Rare, una empresa perteneciente a Microsoft.

Motivados por el éxito de su dispositivo, en 2013 Microsoft decidió sacar al mercado junto con la consola XBox One una nueva versión de este sensor, la Kinect v2, con la cuál se mejoraban muchos de sus componentes y se ampliaban diversas funcionalidades. Para el desarrollo del proyecto NaoTherapist se empleó la primera versión de esta cámara 3D. Sin embargo, en este trabajo nos importa conocer en mayor medida la segunda versión, ya que parte del desarrollo consistirá en actualizar dicho componente en la arquitectura, con el objetivo de poder mejorar las mediciones antropométricas obtenidas durante las sesiones para comparar las posturas.

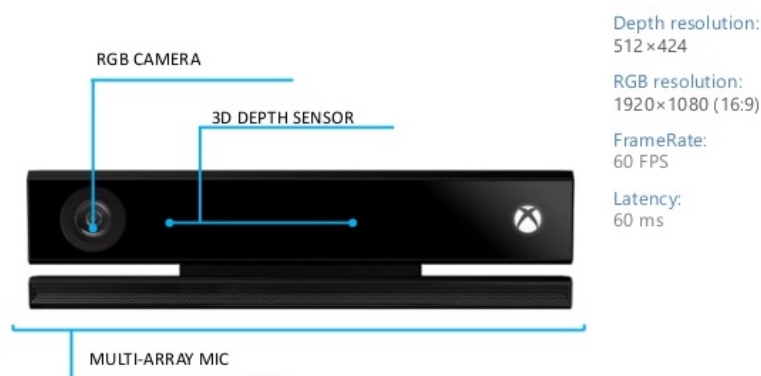


Figura 3.3: Sensor Kinect v2 y sus Componentes.

A continuación, se exponen los distintos componentes que conforman el sensor Kinect v2 en su conjunto (ver figura 3.3), los cuales fueron mejorados respecto a su versión previa:

- *Cámara RGB*: cámara VGA (Video Graphics Array) con una resolución de 1080p y una frecuencia de 30Hz (15 Hz en condiciones de poca luz). Esto permite generar imágenes a una tasa de hasta 60 fps (Frames por Segundo), el doble que su antecesora. Esta nueva cámara ofrece un mayor campo de visión, de 70° horizontales x 60° verticales, al igual que una mejor eliminación del ruido de fondo, lo que mejora la nitidez. Además, ahora esta cámara permite ser usada al mismo tiempo que la cámara de profundidad.
- *Cámara de Profundidad 3D*: este componente se encarga de obtener la imagen de profundidad con la ayuda de los subcomponentes que posee. Varios emisores que emiten señales infrarrojas (*IR Emitters*), las cuales tras rebotar en los objetos que haya delante de la cámara son recogidos por un sensor de infrarrojos, identificando así su profundidad, tal y como puede verse en la figura 3.4. En esta versión, la detección de profundidad es independiente de las condiciones lumínicas de la sala, permitiéndose así su uso en la oscuridad.

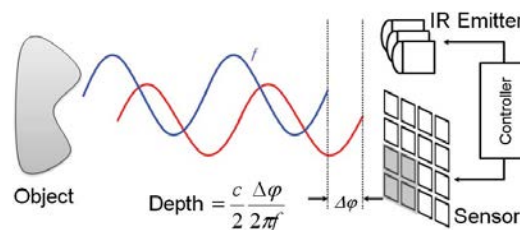


Figura 3.4: Sistema de Detección de Profundidad.

- *Microfófono Multiarray*: conjunto de cuatro microfónos que captan el sonido, siendo capaces de determinar el lugar del que procede el mismo y la dirección de la propia onda. Esto es posible al observar las intensidades con que se recibe el sonido captado en cada microfófono del conjunto.

Así, utilizando todos estos componentes y el SDK de Microsoft, esta herramienta posee las siguientes funcionalidades añadidas a las ya mencionadas de captura y grabación de imágenes de vídeo a color y profundidad y de sonido:

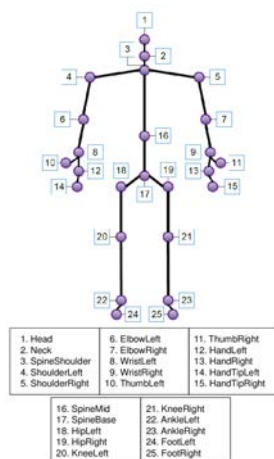


Figura 3.5: Esqueleto Generado por Kinect.

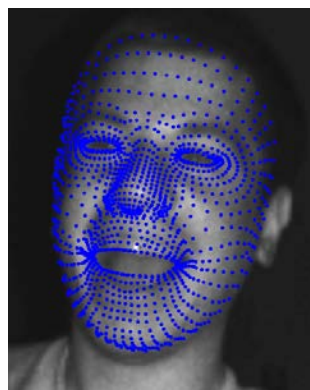


Figura 3.6: Cara Generada por Kinect.

- *Seguimiento y Modelado del Cuerpo Humano*: con los datos de video y profundidad captado, la Kinect es capaz de identificar seres humanos que se encuentren dentro de su rango de visión y a partir de ellos generar un modelo simplificado de su esqueleto. Este esqueleto, que puede verse en la figura 3.5, consta de un total de 25 puntos articulares, a diferencia de los 20 ofrecidos en la primera versión. Respecto a la Kinect original que identificaba solo 2 usuarios a la vez, esta segunda versión es capaz de realizar el seguimiento de hasta 6 personas al mismo tiempo. Además, aquellas partes del cuerpo que no sean visibles para la cámara, ya sean porque estén ocultas tras un objeto o el propio cuerpo, la cámara es capaz de inferirlas, con mayor o menor acierto.
- *Detección de Gestos Manuales*: otra de las funcionalidades se encuentra en la capacidad de detectar gestos hechos por los usuarios con la mano. De esta forma, se puede determinar si la mano está abierta o cerrada, o está realizando gestos de control sencillos como pulsar un botón o rotar una imagen. En la nueva versión, la detección de la mano es mejorada, hasta el punto en que existen ciertos trabajos en los que se consigue capturar perfectamente los dedos de las manos [Li, 2012].
- *Reconocimiento de Caras*: la principal novedad de la nueva versión reside en el reconocimiento y seguimiento de rostros en 3D. El sensor traza una malla de más de 1.000 puntos sobre el rostro facial de una persona, consiguiendo así una precisa representación virtual de la cara del usuario (ver figura 3.6). Esto permite que, mediante la posición de partes como la nariz, la boca o los ojos, la cámara pueda identificar ciertos gestos faciales sencillos como sonreír, guiñar un ojo o abrir la boca.

Además de todo esto, es importante conocer las interfaces a través de las cuales deben realizarse las comunicaciones con la Kinect, para obtener los datos que ésta capta de los usuarios. En concreto, en los siguientes dos apartados se hablará sobre las interfaces de comunicación ZeroICE y WinKinectComp, las cuales ambas forman parte del framework RoboComp, mencionado antes en la sección 3.1, y son utilizadas en la arquitectura NaoTherapist.

3.2.1. ZeroICE

Ice¹ es un lenguaje de programación orientado a objetos que se utiliza para la interacción a bajo nivel de las comunicaciones entre interfaces. Este lenguaje permite realizar la comunicación de forma independientemente de los lenguajes usados entre los componentes comunicados. En la arquitectura NAOTherapist todos los componentes que la conforman se comunican mediante Ice con la interfaz llamada ZeroICE, siendo más sencillo poder acoplar nuevos componentes al proyecto.

3.2.2. WinKinectComp

Este componente es originario del framework Robocomp y se integra en NaoTherapist como una interfaz de comunicación entre el sensor Kinect y el módulo de Visión. Está implementado en C# para poder utilizar directamente el Microsoft Kinect SDK, el cual permite a este componente poder interaccionar con la Kinect y poder preprocesar los datos para enviarlos según el modelo de datos creado. Así pues, se encarga de obtener los datos de la Kinect, de bajo nivel, transformarlos adecuadamente y enviarlos al módulo Vision a través de una interfaz IceStorm. IceStorm es un tipo de servicio de Ice, que posibilita emitir datos a todos los componentes suscritos al servicio cuando tiene lugar un evento determinado.

Por tanto, en WinKinectComp existen una serie de modelos de datos e interfaces con la información de la Kinect transformada, enviados luego por suscripción a eventos. MSKBody se encarga de almacenar la información relacionada con los esqueletos de las personas detectadas por el sensor. MSKFace guarda los datos correspondientes al seguimiento de rostros detectados. MSKHands hace lo propio pero para datos de las manos de las personas identificadas. MSKRGB envía toda la información referente a las imágenes RGB y de profundidad captadas. En último lugar, MSKASR gestiona los datos del sonido percibido. Para poder recibir los datos, los componentes destino deben implementar una interfaz por cada modelo al que se quieran suscribir.

¹<http://www.zeroc.com> - Ultimo acceso el 14/08/2017

3.3. PELEA

La mayoría de sistemas de control robóticos siguen una estrategia reactiva, emitiendo una respuesta ante la información recibida por los sensores. Estos sistemas no son adecuados para hallar una buena solución a la hora de resolver problemas que requieren una visión a largo plazo. Para estos casos, se utilizan los modelos deliberativos, con capacidad de planificar y replanificar las acciones a realizar a partir del estado del mundo percibido.

PELEA (Planning, Execution and Learning Architecture) es una arquitectura desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de Granada y la Universidad Carlos III de Madrid², la cual integra planificación, monitorización, replanificación, ejecución y aprendizaje [Alcázar et al., 2010]. Se trata de una arquitectura genérica cuyo objetivo es conseguir independencia respecto del paradigma de planificación y del robot a utilizar. Además, permite la monitorización de la ejecución de las acciones planificadas, de modo que interacciona constantemente con el estado del mundo, por lo que si no recibe la información generada, ejecuta

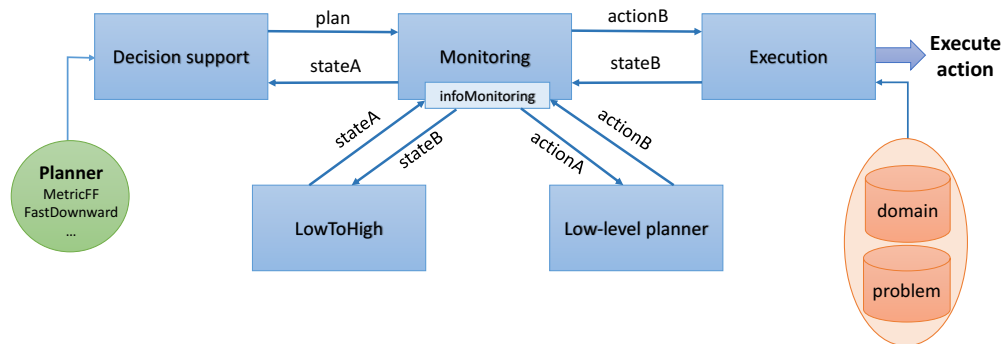


Figura 3.7: Arquitectura PELEA de Dos Niveles.

Esta arquitectura está desarrollada en Java y dividida en diversos módulos que intercambian la información en lenguaje XML. En la figura 3.7 podemos ver cada uno de los componentes que conforman la versión de dos niveles de PELEA, la cual fue la escogida para el desarrollo planteado en este trabajo. Ajenos a estos componentes, con tal de conseguir la generalización mencionada, se encuentran los ficheros del dominio y problema con el estado inicial a planificar, así como el planificador a usar. Los módulos internos son:

²<http://www.plg.inf.uc3m.es/pelea> - Ultimo acceso el 14/08/2017

- *Execution*: es el módulo que de comunicación con el mundo. Tras recibir la información de los sensores, el dominio y el problema, devuelve la siguiente acción a realizar.
- *Monitoring*: monitoriza la correcta ejecución del plan. Comprueba que el estado del mundo corresponde con el esperado y comunica al *Decision support* aquellos predicados relevantes en cada caso. Si no se llega al estado esperado, iniciaría el proceso de replanificación.
- *Decision Support*: módulo de comunicación con el planificador. Primero, decide qué predicados son relevantes y, por tanto, deben ser monitorizados. Luego, en caso de iniciarse la replanificación, genera un nuevo problema a partir del estado actual, pasándole al planificador para obtener el nuevo plan.
- *LowToHigh*: es el traductor de la información de los sensores a sentencias de alto nivel.
- *Low-level Planner*: transforma cada acción de alto nivel en una serie de acciones ejecutables a bajo nivel por el robot.

La arquitectura PELEA ha sido utilizada por multitud de proyectos de la Universidad Carlos III de Madrid, por lo que su correcto funcionamiento está contrastado³. Gracias a su uso, se han desarrollado una gran variedad de sistemas deliberativos, como bots que juegan a videojuegos, generación de acciones paralelas para controlar a dos robots, esquivar obstáculos, coger objetos, etc. También fue escogida para ser incorporada en la arquitectura de NaoTherapist, por lo que siguiendo una línea continuista con el proyecto, se utilizará también en este trabajo.

A continuación, se exponen los dos elementos cuya elección es independiente de PELEA, pero que se usarán junto a dicha arquitectura, el planificador Metric-FF (3.3.1) y el lenguaje de representación del dominio y el problema PDDL (3.3.2).

3.3.1. Metric-FF

Metric-FF⁴ (*Fast Forward*) es un planificador desarrollado por Jörg Hoffmann como una extensión de FF. Con mejoras muy importantes, este planificador permite afrontar problemas más complejos, aunque ofreciendo soluciones sub-óptimas [Hoffmann et al., 2003]. Este planificador participó en la 3ª Competición Internacional de Planificación, siendo galardonado como uno de los dos planificadores numéricos más eficientes.

³<http://www.plg.inf.uc3m.es/pelea/demonstration.php> - Ultimo acceso el 14/08/2017

⁴<http://fai.cs.uni-saarland.de/hoffmann/metric-ff.html> - Ultimo acceso el 14/08/2017

La etiqueta de planificador numérico proviene del uso de variables de estado numéricas. Este planificador proporciona soluciones independientes del dominio, halladas principalmente mediante un proceso de búsqueda heurística en el que se va siguiendo una secuencia de acciones que llegue hasta la meta o metas planteadas. Una característica fundamental de Metric-FF reside en que esta búsqueda heurística se realiza ignorando los efectos negativos de las acciones. Luego, a partir de la resolución de planes relajados y sus correspondientes resultados, como siguiente acción escoge aquella con menor distancia respecto al objetivo o meta final.

Por otro lado, Metric-FF tiene una serie de peculiaridades. Para poder generar un plan, requiere que la definición del dominio y de la instancia del problema se realice en ficheros separados. El orden en el que se escriben las precondiciones en cada una de las acciones y metas también es importante en la generación de planes, debiendo poner las condiciones más restrictivas para ganar en eficiencia del planificador. También se debe de evitar incluir fórmulas que lleven a cabo unificaciones demasiado complejas, como muchas disyunciones seguidas. Además, este planificador permite la inclusión de *fluents* o funciones numéricas que actúan como costes de los efectos de las acciones en los problemas, lo cual provoca una optimización del plan a partir de los valores de dichas funciones.

Debido a su gran potencia en sistemas deliberativos por su uso de variables de estado numéricas y la posibilidad de la utilización de funciones de coste para la optimización del plan, es el planificador escogido para realizar este trabajo. Otro motivo fue su sencillez de instalación y uso, requiriendo únicamente la descarga de un programa y la ejecución de un comando para su utilización. Añadido a esto, tampoco se quería modificar el planificador ya empleado en la arquitectura NaoTherapist para no tener una mayor carga de trabajo con la adaptación de lo ya desarrollado al nuevo planificador.

3.3.2. Planning Domain Definition Language (PDDL)

PDDL es uno de los lenguajes más utilizados para modelar problemas de planificación automática. Se creó en 1990 con la idea de establecer una estandarización de los diferentes lenguajes de planificación [McDermott et al., 1998], por lo que está basado en STRIPS y ADL fundamentalmente. Actualmente, es el lenguaje con mayor aceptación en la comunidad de planificación, siendo el empleado en las competiciones de planificación IPC.

La principal motivación de la creación de un lenguaje como PDDL fue el intento de estandarización de todos los lenguajes de planificación existentes en aquel momento. La adopción de un formalismo común para modelar los dominios de planificación provocaría una mayor reutilización de la investigación, aumentando el número de proyectos de planificación, y la posibilidad de comparar directamente los diferentes sistemas y enfoques entre sí, consiguiendo un mayor progreso.

Las versiones más modernas, como PDDL 3.1, ofrecen una mayor expresividad para representar el conocimiento, permitiendo variables numéricas, preferencias, predicados derivados o restricciones temporales [Fox and Long, 2003] [Gerevini and Long, 2005] [Kovacs, 2012]. Se trata de un modelo de representación muy plano, otorgando una gran facilidad al modelado del dominio y a la instanciación de problemas, los cuales se dividen en ficheros separados de acuerdo a las necesidades de Metric-FF. Este es uno de los motivos por los que es el lenguaje de definición de problemas requerido por dicho planificador.

Al mismo tiempo, se pueden encontrar diversas variantes de PDDL, siendo cada una de ellas especializada en un determinado campo de la planificación o enfoque (efectos probabilísticos, ontologías, abstracción, etc.), aunque dadas las características de este proyecto y el uso que se le dará a la planificación (generación de planes de acciones sencillas en una sesión de terapia) se empleará únicamente PDDL estándar.

Para finalizar, a continuación se incluye un ejemplo de código en PDDL, relacionado con el ejemplo de Planificación Automática del Mundo de los Bloques, visto en la sección 2.2. Primero, el cuadro 3.8 contiene la representación de un problema del Mundo de los Bloques, cuya solución debe alcanzarse a través de un plan de acciones generado. Luego, la figura 3.9 muestra la representación del dominio, en la que se incluyen todas las posibles acciones a realizar, con sus parámetros, precondiciones y efectos, y los predicados o posibles estados del mundo.

```
;; problem file: blocksworld-prob1.pddl  
  
(define (problem blocksworld-prob1)  
  (:domain blocksworld)  
  (:objects a b)  
  (:init (on-table a) (on-table b) (clear a) (clear b))  
  (:goal (and (on a b))))
```

Figura 3.8: Problema del Mundo de los Bloques en PDDL.

```
;; domain file: blocksworld-domain.pddl

(define (domain blocksworld)
  (:requirements :strips)

  (:predicates (clear ?x)
               (on-table ?x)
               (holding ?x)
               (on ?x ?y))

  (:action pickup
    :parameters (?ob)
    :precondition (and (clear ?ob) (on-table ?ob))
    :effect (and (holding ?ob) (not (clear ?ob)) (not (on-table ?ob))))

  (:action putdown
    :parameters (?ob)
    :precondition (and (holding ?ob))
    :effect (and (clear ?ob) (on-table ?ob)
                 (not (holding ?ob))))

  (:action stack
    :parameters (?ob ?underob)
    :precondition (and (clear ?underob) (holding ?ob))
    :effect (and (clear ?ob) (on ?ob ?underob)
                 (not (clear ?underob)) (not (holding ?ob))))

  (:action unstack
    :parameters (?ob ?underob)
    :precondition (and (on ?ob ?underob) (clear ?ob))
    :effect (and (holding ?ob) (clear ?underob)
                 (not (on ?ob ?underob)) (not (clear ?ob)))))
```

Figura 3.9: Dominio del Mundo de los Bloques en PDDL.

Capítulo 4

Análisis de la Plataforma

Este cuarto capítulo del documento hace referencia a la fase de Análisis del proceso de desarrollo, en el cuál se tratan las capacidades, funcionalidades y restricciones que deberán presentar los nuevos componentes desarrollados o actualizados de la plataforma NaoTherapist. Por tanto, en esta fase se obtiene una descripción detallada del sistema, captando las necesidades de los terapeutas que más tarde emplearán la herramienta en sus terapias.

Esta captura de las necesidades se plasmará en forma de escenarios, requisitos y casos de uso, en ese mismo orden. Cabe destacar que todo este proceso de análisis de necesidades e identificación de requisitos se ha llevado a cabo a través de dos técnicas de recogida de datos. En primer lugar, se procedió a realizar una observación y grabación del funcionamiento inicial de distintos aspectos de la plataforma, delimitando el entorno sobre el que se iba a trabajar y detectando algunas posibles vías de mejora. Luego, se organizaron entrevistas individuales con algunos terapeutas y otros profesionales en materia de rehabilitación, presentándoles las observaciones anteriores y recogieron diversas opiniones y necesidades que iban planteando. Cabe destacar que dos de estas entrevistas fueron con la organizadora y con la coordinadora de terapeutas del campamento de terapia intensiva.

Primero, en la sección 4.1, se exponen los resultados de las observaciones y entrevistas realizadas, detallando las mejoras afrontadas. A continuación, se estructura dicha información en forma de descripción de Escenarios (apartado 4.2), elaboración de los Diagramas de Caso de Uso (apartado 4.3) y especificación de Requisitos (4.4). Todas contendrán dichos elementos divididos según la función principal tratada, siendo estos: reconocimiento de poses, planificación de sesiones de terapia y sistema de adaptación al usuario.

4.1. Mejoras Analizadas

La finalidad del presente proyecto consiste en una actualización de la plataforma de NaoTherapist, de cara a su inclusión como herramienta terapéutica de apoyo en el primer campamento de terapia intensiva HABIT organizado en España, tal y como se detalló al inicio de este documento. Esta actualización no solo incluye el perfeccionamiento de lo ya implementado en la arquitectura NaoTherapist, sino un análisis de aquello que es susceptible de mejora y de las nuevas funcionalidades que podrían desarrollarse de cara a ofrecer una interacción robot-paciente mejorada en el campamento.

Así, en esta actualización, primero se incluye una mejora en el proceso de captación de datos antropométricos de los pacientes que realizan la sesión. Con el nuevo desarrollo de este componente, se pretende conseguir una mejor calidad de la información recibida por el sensor con la integración de la segunda versión de la Kinect en la arquitectura, dando con ello una mayor robustez y precisión a la captura de datos del paciente. Para alcanzar este objetivo, se ha trabajado en una actualización de la mencionada en la sección 3.2.2 interfaz *WinKinectComp*, siendo adaptada a los nuevos datos proporcionados por el sensor Kinect v2.

Además, tras analizar con médicos rehabilitadores y terapeutas ocupacionales expertos el modelo antropométrico de ángulos que presentaba inicialmente la plataforma, se concluyó que éste no llegaba a ser del todo intuitivo para los profesionales clínicos que participasen en las terapias de rehabilitación, puesto que seguían unos cálculos y nomenclaturas extraños a su conocimiento de la materia. Por tanto, se ha desarrollado un nuevo módulo de *Vision*, cuyas funciones ya han sido detalladas en el apartado 3.1, con un nuevo modelo de representación del estado postural del paciente más familiarizado con el conocimiento experto de las terapias de rehabilitación. Al mismo tiempo que se realizaba este análisis de mejora, muchos de los terapeutas preguntaban por la posibilidad de observar los ángulos calculados en tiempo real, motivo por el cual también se trabajó en una nueva interfaz gráfica del componente que incluyera una vista de los ángulos biomecánicos del usuario observado.

Todos estos cambios importantes en el componente de *Vision* provocaron, a su vez, que tuvieran que realizarse otros relacionados con el almacenado de las poses en un catálogo y la comparación de dichas poses con la llevada a cabo por el paciente durante la terapia, debido a que el nuevo modelo de ángulos cambiaba drásticamente las mediciones y la organización de la información respecto al modelo anterior.

Después, más encaminado a la adaptación de la plataforma a un ambiente de terapia intensiva, se encuentra el desarrollo relacionado con la planificación de las sesiones de rehabilitación. Inicialmente, el sistema robótico de NaoTherapist se diseñó para que guiara a los pacientes en un único tipo de actividad llamado “mirroring”, o ejercicio del espejo, en el que los paciente deben imitar las poses que va ejecutando el robot y son corregidos en caso de hacerlo incorrectamente. Más tarde, gracias al trabajo de Misra Turp se diseñó también el juego electrónico del Simón, pero con poses en lugar de colores [Turp et al., 2015], donde el robot enseña un conjunto de poses, que va incrementando en cada turno, el cual luego el paciente debe imitar en el mismo orden acordándose de las poses mostradas por el robot.

No obstante, este juego del Simón no podía integrarse en una misma sesión junto al ejercicio del espejo, sino que debían ejecutarse por separado al estar en un componente a parte. De esta forma, previamente a las entrevistas con los terapeutas surgió la necesidad de desarrollar un nuevo dominio de planificación para las sesiones de terapia, que permitiera realizar varias actividades de distinto tipo en una misma sesión. Por ello, ésta ha sido otra de las líneas de desarrollo en las que se ha trabajado en este proyecto.

Añadido a esto, durante las reuniones con los profesionales que formaban parte del campamento de terapia intensiva, se descubrió la necesidad de implantar una mayor variedad de actividades distintas en la plataforma. Esta necesidad se debe a las características del campamento principalmente, puesto que se repetirían las mismas sesiones en días consecutivos, por lo que la monotonía, y la consiguiente pérdida de motivación de los niños, se evita con la realización de diferentes tipos de ejercicios durante toda la terapia.

Una de las peticiones que realizaron fue la de incorporar un ejercicio parecido al espejo en el que el robot dictara comandos de voz que luego el niño debía llevar a cabo correctamente, de manera que se trabajara la atención por parte del niño, una parte más cognitiva, sin dejar de lado la rehabilitación física. Así, se diseñó el juego *Nao Says*, en el que el robot NAO intenta mediante comandos de voz que los niños toquen una parte concreta de su propio cuerpo con cualquiera de las manos o con una mano en concreto.

Además del juego del Simón, el cual les pareció muy interesante incluir en las terapias y que a partir de entonces pasaría a llamarse *Memory* para evitar confusiones, otro nuevo juego a incorporar a solicitud de los terapeutas fue el *Inverse Memory*. Su única diferencia respecto al primero consiste en que el paciente debe ejecutar las poses mostradas anteriormente por el robot en el orden inverso, suponiendo un mayor reto cognitivo para el niño.

Cómo última novedad incorporada a la arquitectura NaoTherapist en este trabajo, se encuentra el sistema de adaptación al usuario. Según palabras de la coordinadora del campamento, otro factor de gran importancia en las terapias de rehabilitación recae en la adaptación de la terapia a las necesidades clínicas de cada usuario, debido a la gran heterogeneidad de pacientes que requieren estas terapias, teniendo en cuenta tanto la afección mostrada como su grado de severidad.

En las terapias desarrolladas con NaoTherapist, esta adaptación al usuario puede entenderse de dos maneras: una más relacionada con el propio diseño de las sesiones o la elección de los ejercicios y poses recomendados para cada niño en concreto; y otra referente a la dificultad de la sesión, enmascarada en este caso bajo la decisión del sistema de marcar una pose como correcta o no.

En la siguiente tabla 4.1 se puede ver un cuadro resumen de todas estas mejoras analizadas y cuyo desarrollo se planificó. Los escenarios, requisitos y casos de uso que los conforman son expuestos en las siguientes secciones. Como se verá más tarde en el capítulo 5, la estructura del diseño seguirá una estructura muy similar a ésta.

Componentes Implicados	Función Principal	Necesidad Concreta
<i>Vision & Knowledge Base</i>	Reconocimiento de Poses	Nuevo Modelo Biomecánico Articular
		Monitorización en Tiempo Real
		Cambios en el Catálogo de Poses
		Nueva Comparación de Poses
<i>Executive</i>	Planificación de Sesiones	Generalización del Dominio
		Modelado de Nuevas Actividades
<i>Executive & Knowledge Base</i>	Adaptación al Usuario	Personalización de Umbrales
		Personalización de las Poses
		Personalización de las Sesiones

Tabla 4.1: Cuadro Resumen de las Mejoras Analizadas.

4.2. Escenarios

Un Escenario es una descripción parcial y concreta del comportamiento de un sistema en una situación específica. No detalla todas las características de las entidades involucradas, sólo describe aquello relacionado con un comportamiento particular del sistema analizado. Con estos casos de uso, se describe todo el contexto de las actividades relacionadas con el sistema: recursos del sistema, objetivos de los usuarios y actores involucrados. Así, se puede proporcionar una vista de cómo se lleva a cabo cada actividad.

Los escenarios correspondientes al desarrollo realizado se expondrán en esta sección en forma de tablas, y todos ellos tendrán los siguientes elementos:

- IDENTIFICADOR: E-Mxx – Nombre, donde:

‘E’: significa que es un escenario;

‘M’: es el módulo o componente involucrado, pudiendo ser éste:

‘V’ si está relacionado con el reconocimiento de poses de Vision,

‘P’ si es con la planificación de sesiones,

‘U’ si trata la adaptación al usuario; y xx es el número de escenario.

Nombre: es el título descriptivo del escenario.

- SITUACIÓN: Breve descripción sobre el contexto en el que se encuentra el escenario, incluyendo objetivos del usuario y entidades involucradas.
- CASO DE USO: Referencia al diagrama en el que luego se representará el escenario.
- PRECONDICIONES: Condiciones que deben ser cumplidas antes del inicio del escenario.
- PROCESO: Conjunto de acciones ordenadas que el usuario debe seguir para alcanzar el objetivo identificado.
- FLUJO ALTERNATIVO: Conjunto de acciones que suponen un flujo distinto al acontecido normalmente en el escenario.
- POSTCONDICIONES: Condiciones que se deben cumplidas después del finalizar el proceso del escenario.

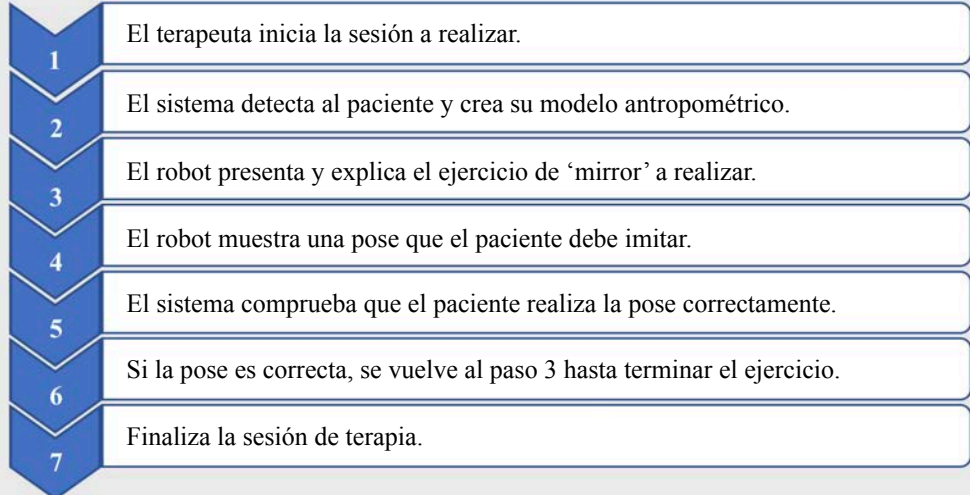
ID: E-V01 ~ Ejecución de una Sesión de ‘Mirror’	
SITUACIÓN:	El terapeuta quiere realizar una sesión de terapia con el paciente, la cual por el momento consiste únicamente en un ejercicio de ‘mirroring’ o espejo. En ésta, el cuerpo del paciente será monitorizado, comprobando que realiza correctamente las poses presentadas.
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento. La sesión de terapia a llevar a cabo también debe de haber sido configurada antes. El paciente debe estar debidamente colocado delante del robot y el sensor de movimiento.
PROCESO:	 <pre> graph TD 1[1] --> 2[2] 2 --> 3[3] 3 --> 4[4] 4 --> 5[5] 5 --> 6[6] 6 --> 7[7] </pre> <ol style="list-style-type: none"> El terapeuta inicia la sesión a realizar. El sistema detecta al paciente y crea su modelo antropométrico. El robot presenta y explica el ejercicio de ‘mirror’ a realizar. El robot muestra una pose que el paciente debe imitar. El sistema comprueba que el paciente realiza la pose correctamente. Si la pose es correcta, se vuelve al paso 3 hasta terminar el ejercicio. Finaliza la sesión de terapia.
FLUJOS ALTERNATIVOS:	<p>6.1. Si la pose hecha por el paciente no es correcta, el robot le corrige. Luego, vuelve al paso 5, hasta llegar al número máximo de intentos.</p>
POSTCONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> La sesión debe quedar como finalizada y el robot en estado de reposo.

Tabla 4.2: Escenario del Sistema E-V01.

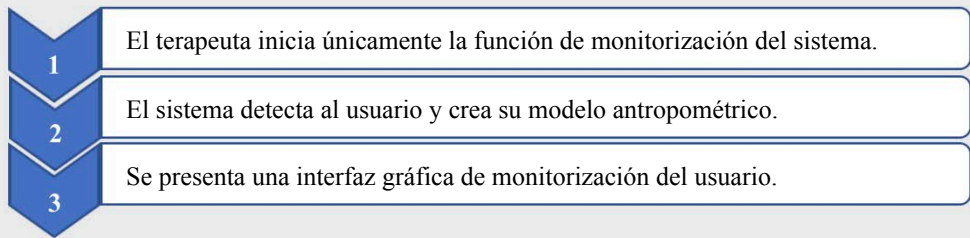
ID: E-V02 ~ Monitorización/Evaluación del Paciente	
SITUACIÓN:	El terapeuta, sin iniciar ninguna sesión de terapia, quiere monitorizar en tiempo real los ángulos articulares que el sistema detecta del paciente situado delante del sensor, con el fin de evaluar sus capacidades físicas.
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> • La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento. • El paciente debe estar debidamente colocado delante del sensor de movimiento.
PROCESO:	 <pre> graph LR 1[1] --> 2[2] 2 --> 3[3] 1 --- T1[El terapeuta inicia únicamente la función de monitorización del sistema.] 2 --- T2[El sistema detecta al usuario y crea su modelo antropométrico.] 3 --- T3[Se presenta una interfaz gráfica de monitorización del usuario.] </pre>
FLUJOS ALTERNATIVOS:	- - -
POSTCONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> • El sistema debe mostrar información sobre los ángulos calculados en el modelo antropométrico, además de una imagen del esqueleto, con actualizaciones casi constantes.

Tabla 4.3: Escenario del Sistema E-V02.

ID: E-V03 ~ Adición de una Nueva Pose al Catálogo General	
SITUACIÓN:	
El terapeuta necesita crear una nueva pose, que pueda ser guardada en el catálogo, con la intención de que luego pueda ser usada en las sesiones de terapia con el paciente.	
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	
<ul style="list-style-type: none"> La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento. Un usuario sano debe estar debidamente colocado delante del sensor de movimiento. 	
PROCESO:	
1	El terapeuta inicia únicamente la función de monitorización del sistema.
2	El sistema detecta al usuario y crea su modelo antropométrico.
3	Se presenta una interfaz gráfica de monitorización del usuario.
4	El terapeuta comprueba que la postura del usuario es la deseada.
5	El terapeuta debe introducir nombre de la pose y articulaciones involucradas.
6	Pulsando un botón, se comprueba que el robot adopta una pose similar.
7	Pulsando otro botón, la nueva pose se guarda en la Base del Conocimiento.
FLUJOS ALTERNATIVOS:	
<p>4.1. Si la postura no es la deseada, el terapeuta le indica que la corrija, y se repite el paso 4.</p> <p>6.1. Si la pose del robot similar, el terapeuta corrige al usuario y se vuelve al paso 4.</p>	
POSTCONDICIONES:	
<ul style="list-style-type: none"> El robot debe quedar en estado de reposo. La pose debe quedar correctamente guardada en el catálogo de poses, lista para ser usada. 	

Tabla 4.4: Escenario del Sistema E-V03.

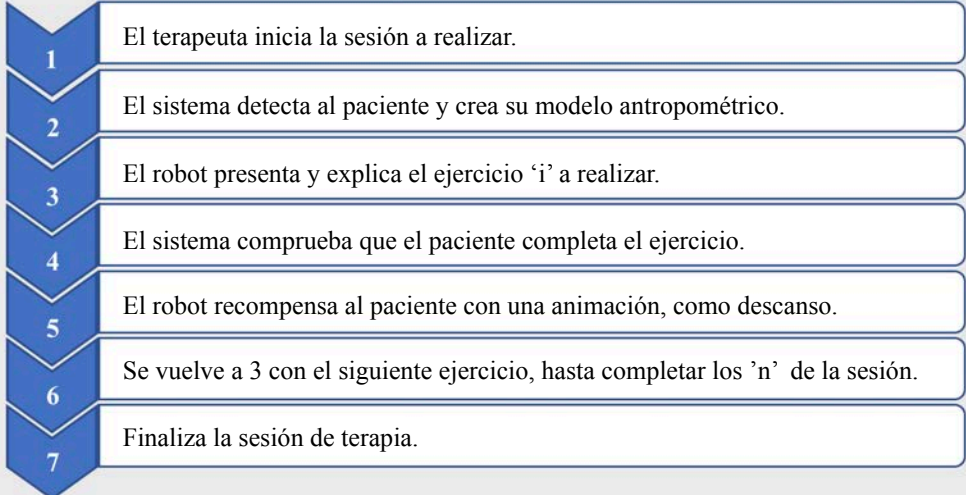
ID: E-P01 ~ Ejecución de una Sesión con Varios Tipos de Actividades	
SITUACIÓN:	El terapeuta quiere realizar una sesión de terapia con el paciente, en la cual se realicen varios tipos de ejercicios sin tener que parar la ejecución de la misma.
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento. La sesión de terapia a llevar a cabo también debe de haber sido configurada antes. El paciente debe estar debidamente situado delante del robot y el sensor de movimiento.
PROCESO:	 <pre> graph TD 1[1] --> 2[2] 2 --> 3[3] 3 --> 4[4] 4 --> 5[5] 5 --> 6[6] 6 --> 7[7] </pre> <ol style="list-style-type: none"> El terapeuta inicia la sesión a realizar. El sistema detecta al paciente y crea su modelo antropométrico. El robot presenta y explica el ejercicio 'i' a realizar. El sistema comprueba que el paciente completa el ejercicio. El robot recompensa al paciente con una animación, como descanso. Se vuelve a 3 con el siguiente ejercicio, hasta completar los 'n' de la sesión. Finaliza la sesión de terapia.
FLUJOS ALTERNATIVOS:	- - -
POSTCONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> La sesión debe quedar como finalizada y el robot en estado de reposo. La diversión y calidad de las animaciones ejecutadas debe ser proporcional a lo bien que haya hecho el paciente el correspondiente ejercicio.

Tabla 4.5: Escenario del Sistema E-P01.

ID: E-P02 ~ Ejecución de un Ejercicio de ‘Mirror’	
SITUACIÓN:	Dentro de una sesión de terapia, el terapeuta quiere que el paciente realice un ejercicio del espejo.
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> • La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento. • El ejercicio de ‘mirror’ debe de haber sido configurada antes como parte de una sesión. • El paciente debe estar debidamente situado delante del robot y el sensor de movimiento. • La sesión de terapia debe de haber sido ya iniciada.
PROCESO:	<pre> graph TD 1[1. El robot introduce el ejercicio y detalla las instrucciones del juego 'Mirror'.] --> 2[2. El robot muestra la pose 'i' a imitar por el paciente.] 2 --> 3[3. El sistema comprueba que el paciente imita correctamente la pose.] 3 --> 4[4. Si la pose es correcta, se vuelve a 2 con la siguiente pose, hasta realizar 'n'.] 4 --> 5[5. El robot recompensa al paciente con una animación, como descanso.] 5 --> 6[6. Finaliza el ejercicio que desarrolla el juego del 'Mirror'.] </pre>
FLUJOS ALTERNATIVOS:	<p>4.1. Si la pose es incorrecta, el robot intenta corregir al paciente y vuelve al paso 3.</p> <p>4.2. Si es incorrecta y se alcanza el máximo de intentos, se salta la pose y vuelve al paso 2.</p>
POSTCONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> • El ejercicio debe quedar como finalizada para pasar al siguiente o terminar la sesión . • La diversión de la animación será acorde a lo bien que el paciente haya hecho el ejercicio.

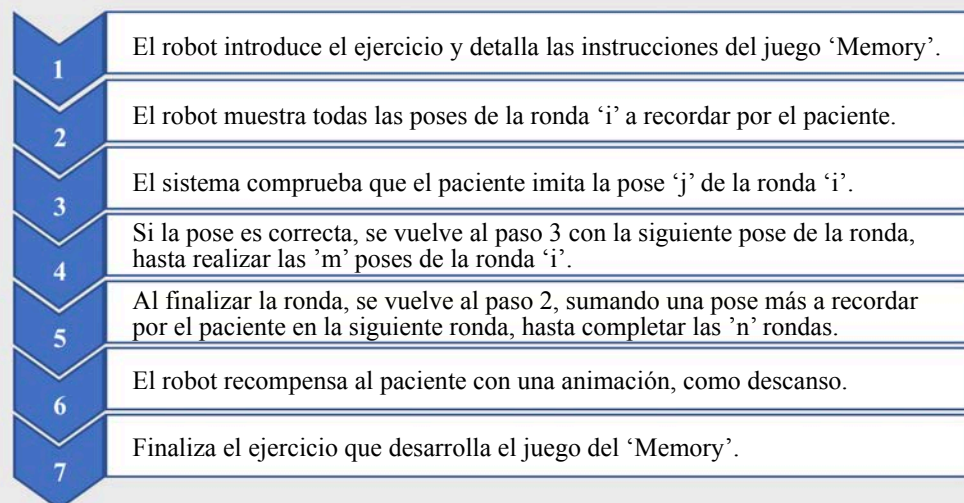
Tabla 4.6: Escenario del Sistema E-P02.

ID: E-P03 ~ Ejecución de un Ejercicio de ‘Memory’**SITUACIÓN:**

Dentro de una sesión de terapia, el terapeuta quiere que se realice un ejercicio del ‘Memory’.

CASO DE USO:**PRECONDICIONES:**

- La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento.
- El ejercicio de ‘memory’ debe de haber sido configurada antes como parte de una sesión.
- El paciente debe estar debidamente situado delante del robot y el sensor de movimiento.
- La sesión de terapia debe de haber sido ya iniciada.

PROCESO:**FLUJOS ALTERNATIVOS:**

- 4.1. Si la pose es incorrecta, el robot intenta corregir al paciente y vuelve al paso 3 comprobando otro vez la misma pose.
- 4.2. Si es incorrecta y se ha llegado al número máximo de intentos, se salta la pose, volviendo al paso 3 para comprobar la realización de la siguiente pose.

POSTCONDICIONES:

- El ejercicio debe quedar como finalizada para pasar al siguiente o terminar la sesión .
- La diversión de la animación será acorde a lo bien que el paciente haya hecho el ejercicio.

Tabla 4.7: Escenario del Sistema E-P03.

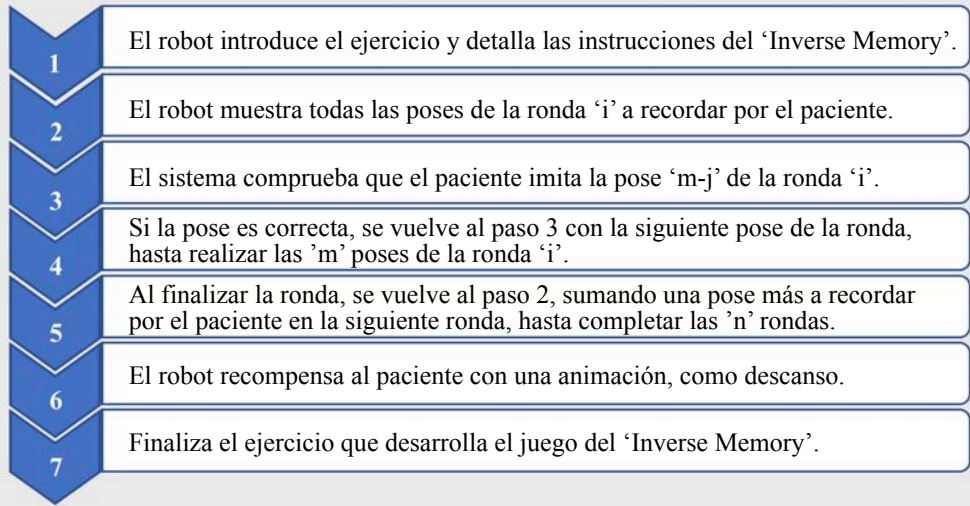
ID: E-P04 ~ Ejecución de un Ejercicio de 'Inverse Memory'	
SITUACIÓN:	Dentro de una sesión, el terapeuta quiere que se realice un ejercicio del 'Inverse Memory'.
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento. El ejercicio 'inverse memory' debe de haberse configurado antes como parte de una sesión. El paciente debe estar debidamente situado delante del robot y el sensor de movimiento. La sesión de terapia debe de haber sido ya iniciada.
PROCESO:	 <pre> graph TD 1[1. El robot introduce el ejercicio y detalla las instrucciones del 'Inverse Memory'.] --> 2[2. El robot muestra todas las poses de la ronda 'i' a recordar por el paciente.] 2 --> 3[3. El sistema comprueba que el paciente imita la pose 'm-j' de la ronda 'i'.] 3 --> 4[4. Si la pose es correcta, se vuelve al paso 3 con la siguiente pose de la ronda, hasta realizar las 'm' poses de la ronda 'i'.] 4 --> 5[5. Al finalizar la ronda, se vuelve al paso 2, sumando una pose más a recordar por el paciente en la siguiente ronda, hasta completar las 'n' rondas.] 5 --> 6[6. El robot recompensa al paciente con una animación, como descanso.] 6 --> 7[7. Finaliza el ejercicio que desarrolla el juego del 'Inverse Memory'.] </pre>
FLUJOS ALTERNATIVOS:	<p>4.1. Si la pose es incorrecta, el robot intenta corregir al paciente y vuelve al paso 3 comprobando otra vez la misma pose.</p> <p>4.2. Si es incorrecta y se ha llegado al número máximo de intentos, se salta la pose, volviendo al paso 3 para comprobar la realización de la siguiente pose.</p>
POSTCONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> El ejercicio debe quedar como finalizada para pasar al siguiente o terminar la sesión . La diversión de la animación será acorde a lo bien que el paciente haya hecho el ejercicio.

Tabla 4.8: Escenario del Sistema E-P04.

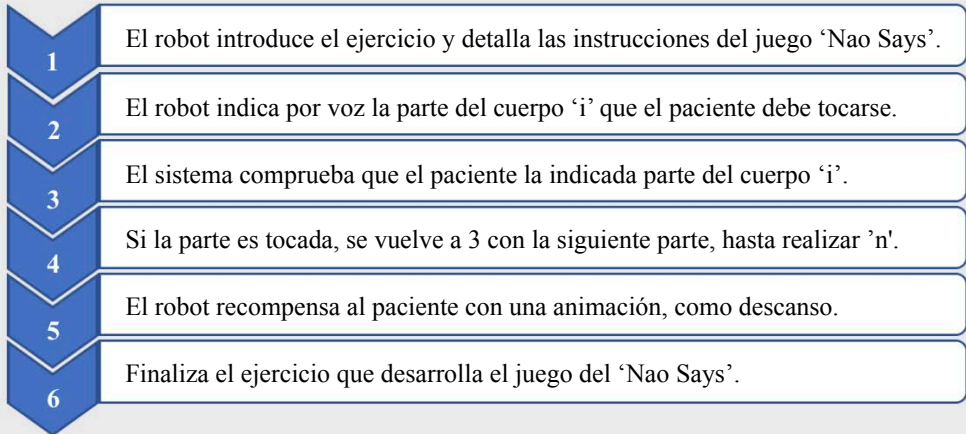
ID: E-P05 ~ Ejecución de un Ejercicio de ‘Nao Says’	
SITUACIÓN:	Dentro de una sesión, el terapeuta quiere que el paciente realice un ejercicio del ‘Nao Says’.
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> • La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento. • El ejercicio de ‘nao says’ debe de haber sido configurada antes como parte de una sesión. • El paciente debe estar debidamente situado delante del robot y el sensor de movimiento. • La sesión de terapia debe de haber sido ya iniciada.
PROCESO:	 <pre> graph TD 1[1. El robot introduce el ejercicio y detalla las instrucciones del juego 'Nao Says'.] --> 2[2. El robot indica por voz la parte del cuerpo 'i' que el paciente debe tocarse.] 2 --> 3[3. El sistema comprueba que el paciente la indicada parte del cuerpo 'i'.] 3 --> 4[4. Si la parte es tocada, se vuelve a 3 con la siguiente parte, hasta realizar 'n'.] 4 --> 5[5. El robot recompensa al paciente con una animación, como descanso.] 5 --> 6[6. Finaliza el ejercicio que desarrolla el juego del 'Nao Says'.] </pre>
FLUJOS ALTERNATIVOS:	<p>4.1. Si la pose es incorrecta, el robot intenta corregir al paciente y vuelve al paso 3.</p> <p>4.2. Si es incorrecta y se ha llegado al número máximo de intentos, se salta la parte del cuerpo, volviendo al paso 3 para comprobar el tocamiento de la siguiente parte del cuerpo.</p>
POSTCONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> • El ejercicio debe quedar como finalizada para pasar al siguiente o terminar la sesión . • La diversión de la animación será acorde a lo bien que el paciente haya hecho el ejercicio.

Tabla 4.9: Escenario de Uso del Sistema E-P05.

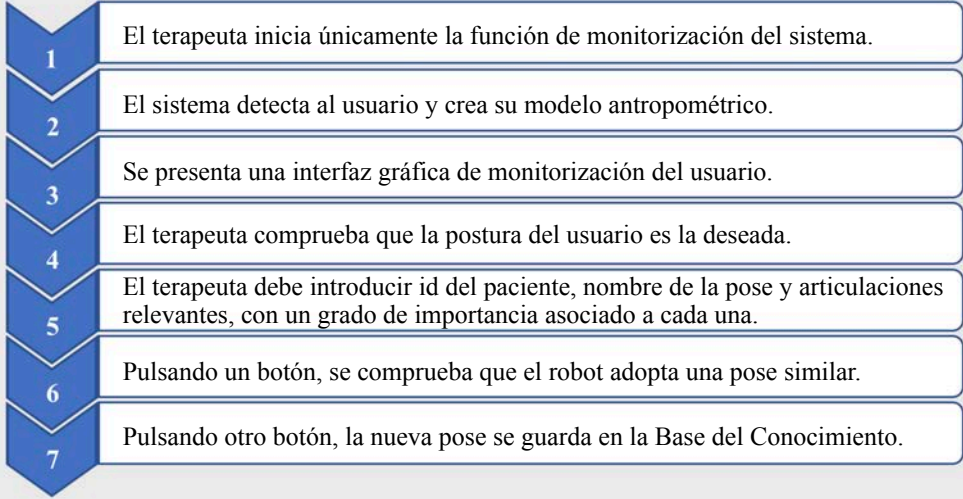
ID: E-U01 ~ Adición de una Nueva Pose al Catálogo Personalizado de un Paciente	
SITUACIÓN:	El terapeuta necesita crear una nueva pose, que pueda ser guardada en el catálogo personal de un paciente concreto, con la intención de usarse en las sesiones de terapia de solo dicho paciente.
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento. Un usuario sano debe estar debidamente colocado delante del sensor de movimiento.
PROCESO:	 <pre> graph TD 1[1. El terapeuta inicia únicamente la función de monitorización del sistema.] --> 2[2. El sistema detecta al usuario y crea su modelo antropométrico.] 2 --> 3[3. Se presenta una interfaz gráfica de monitorización del usuario.] 3 --> 4[4. El terapeuta comprueba que la postura del usuario es la deseada.] 4 --> 5[5. El terapeuta debe introducir id del paciente, nombre de la pose y articulaciones relevantes, con un grado de importancia asociado a cada una.] 5 --> 6[6. Pulsando un botón, se comprueba que el robot adopta una pose similar.] 6 --> 7[7. Pulsando otro botón, la nueva pose se guarda en la Base del Conocimiento.] </pre>
FLUJOS ALTERNATIVOS:	- - -
POSTCONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> El robot debe quedar en estado de reposo. La nueva pose debe quedar correctamente guardada en el catálogo de poses personal del paciente indicado en la interfaz, lista para ser usada únicamente con dicho paciente.

Tabla 4.10: Escenario de Uso del Sistema E-U01.

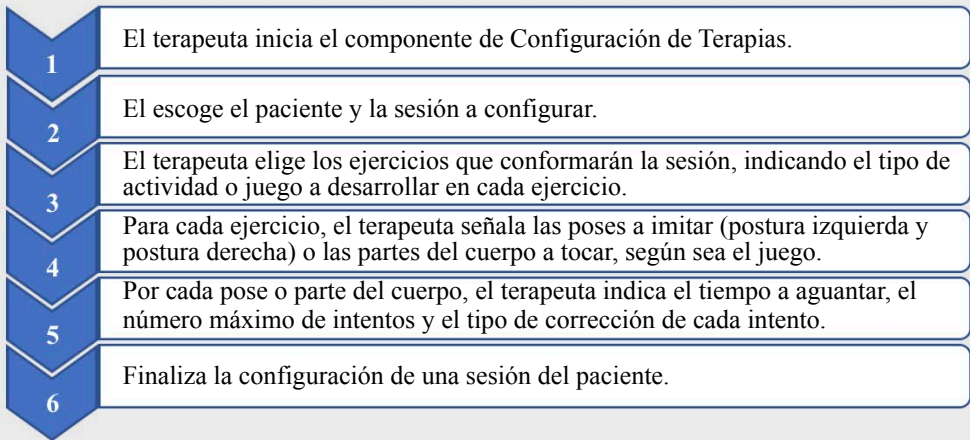
ID: E-U02 ~ Configuración de una Sesión Adaptada al Paciente	
SITUACIÓN:	El terapeuta necesita configurar sesiones de terapia adaptadas a las necesidades de cada paciente.
CASO DE USO:	
PRECONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> La plataforma debe estar correctamente instalada y lista para su funcionamiento.
PROCESO:	 <pre> graph TD 1[1. El terapeuta inicia el componente de Configuración de Terapias.] --> 2[2. El escoge el paciente y la sesión a configurar.] 2 --> 3[3. El terapeuta elige los ejercicios que conformarán la sesión, indicando el tipo de actividad o juego a desarrollar en cada ejercicio.] 3 --> 4[4. Para cada ejercicio, el terapeuta señala las poses a imitar (postura izquierda y postura derecha) o las partes del cuerpo a tocar, según sea el juego.] 4 --> 5[5. Por cada pose o parte del cuerpo, el terapeuta indica el tiempo a aguantar, el número máximo de intentos y el tipo de corrección de cada intento.] 5 --> 6[6. Finaliza la configuración de una sesión del paciente.] </pre>
FLUJOS ALTERNATIVOS:	- - -
POSTCONDICIONES:	<ul style="list-style-type: none"> El robot debe quedar en estado de reposo. La nueva pose debe quedar correctamente guardada en el catálogo de poses personal del paciente indicado en la interfaz, lista para ser usada únicamente con dicho paciente.

Tabla 4.11: Escenario de Uso del Sistema E-U02.

4.3. Diagramas de Casos de Uso

A diferencia de un requisito, un caso de uso es una representación gráfica de los pasos o acciones que deben realizarse en el sistema para llegar a alcanzar un determinado objetivo. Por tanto, son elementos de análisis más parecidos a los escenarios, pero en forma de diagramas, y con la diferencia de que tratan específicamente la interacción entre un sistema y los actores involucrados en el proceso representado, pudiendo observar el comportamiento del sistema a las acciones de los usuarios.

En este contexto, un actor es toda entidad externa al sistema que guarda una relación con éste al demandarle una funcionalidad o requisito específico. Esta definición incluye tanto a usuarios humanos como a otros sistemas externos o entidades abstractas. En el caso de los actores como seres humanos, un actor es cada rol que puede desempeñar un individuo, por lo que una misma persona puede representar uno o varios actores. En este caso, se pueden distinguir claramente algunos actores, como el paciente y el terapeuta, pero el robot NAO y el sensor Kinect también serán considerados aquí como agentes, puesto que, aunque ambos forman parte de la plataforma NaoTherapist, son herramientas externas que pueden ser intercambiadas por otras similares.

Los diagramas de casos de uso siguen la notación presentada en la figura 4.1:

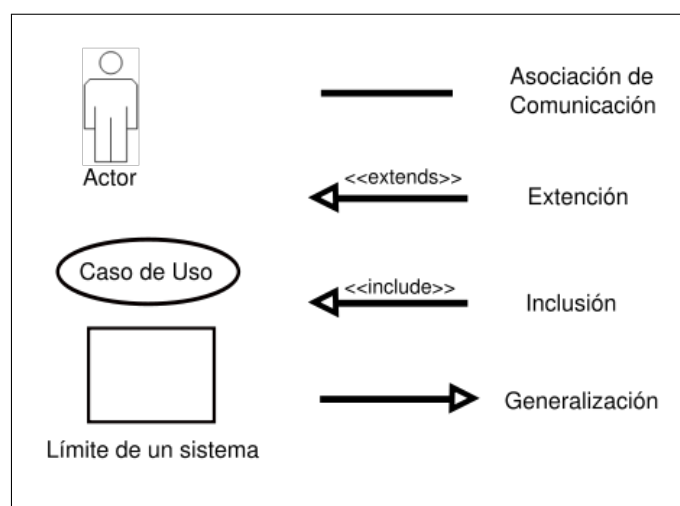


Figura 4.1: Notación de los Diagramas de Casos de Uso.

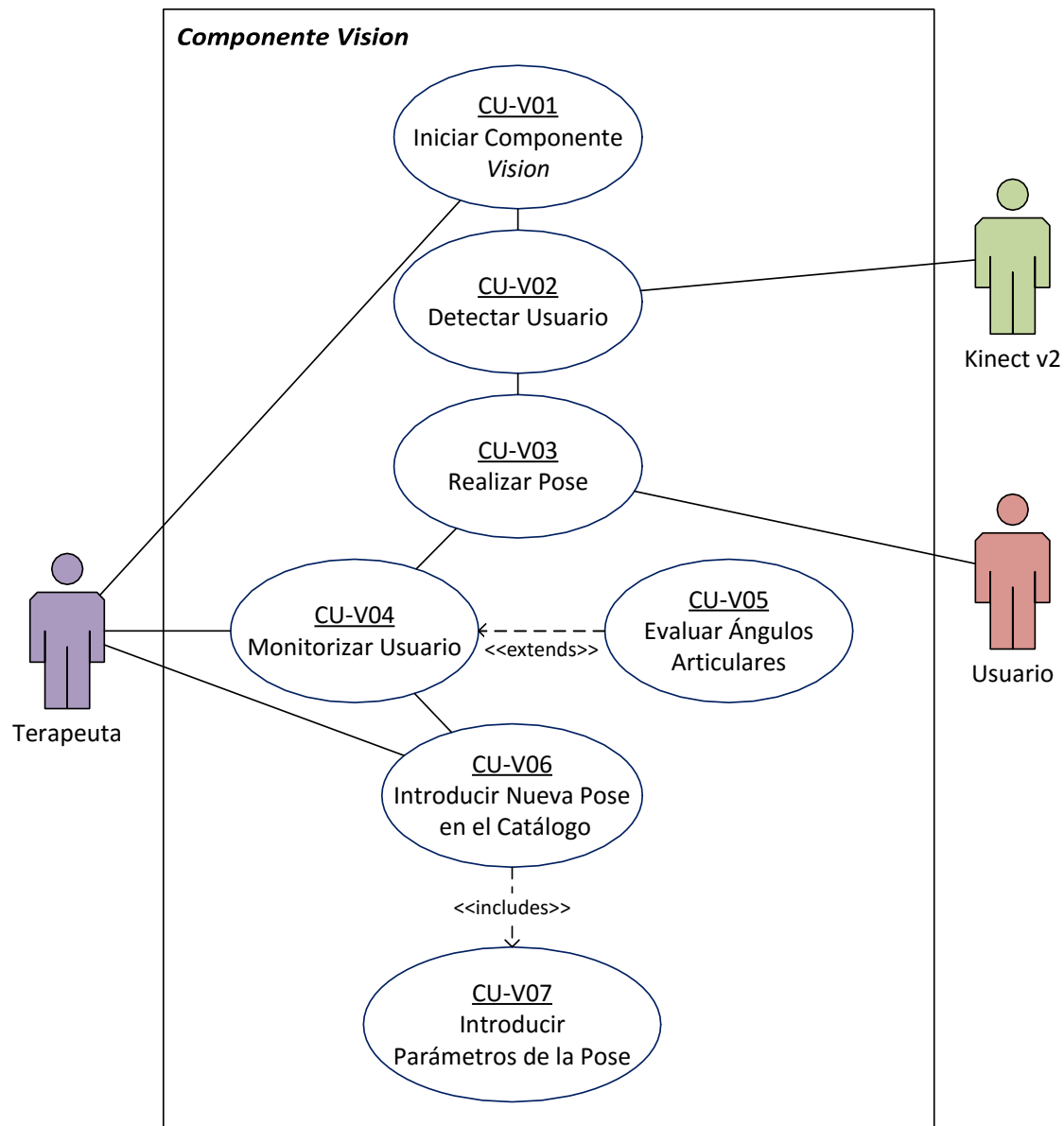


Tabla 4.12: Diagrama de Casos de Uso DCU-01.

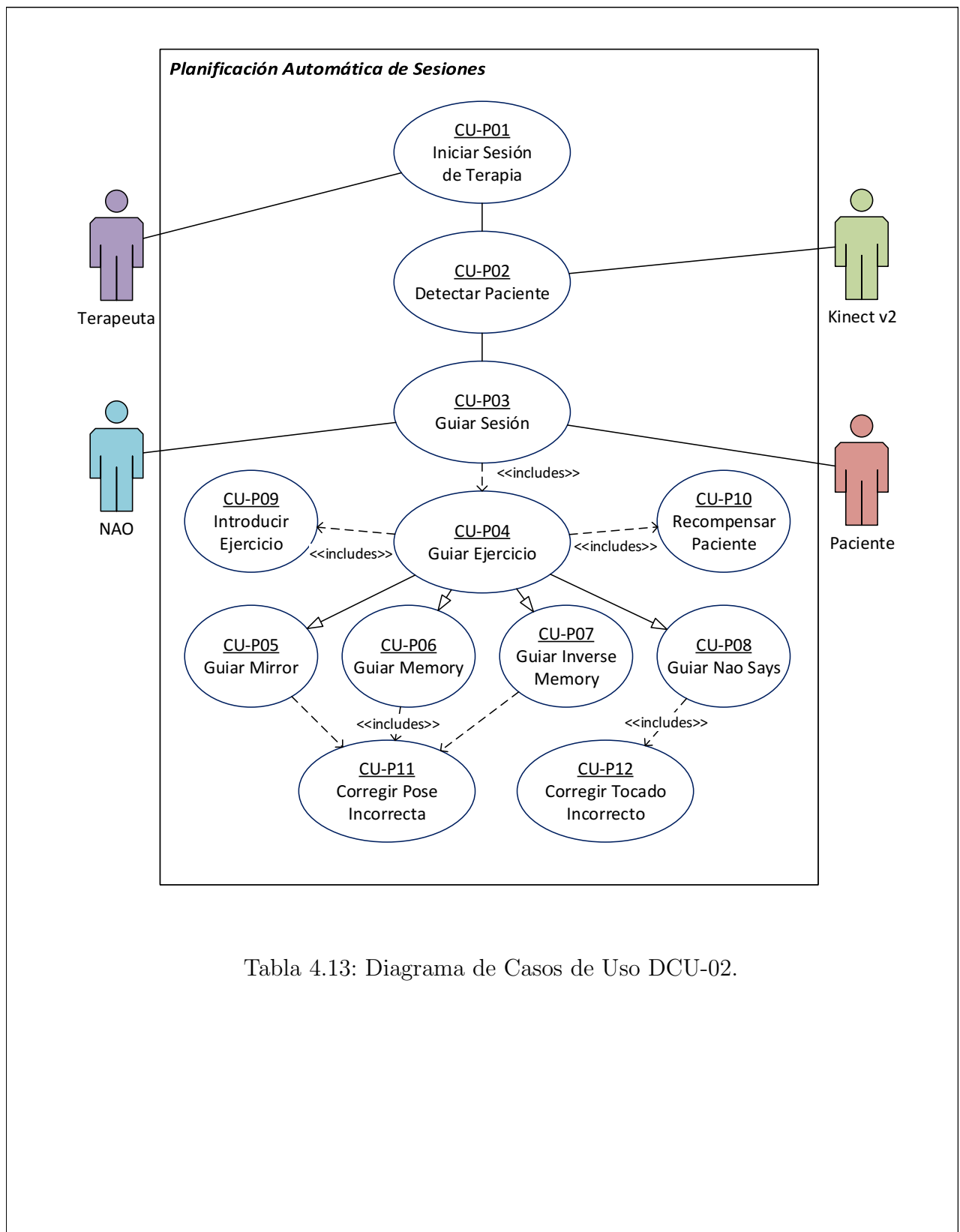


Tabla 4.13: Diagrama de Casos de Uso DCU-02.

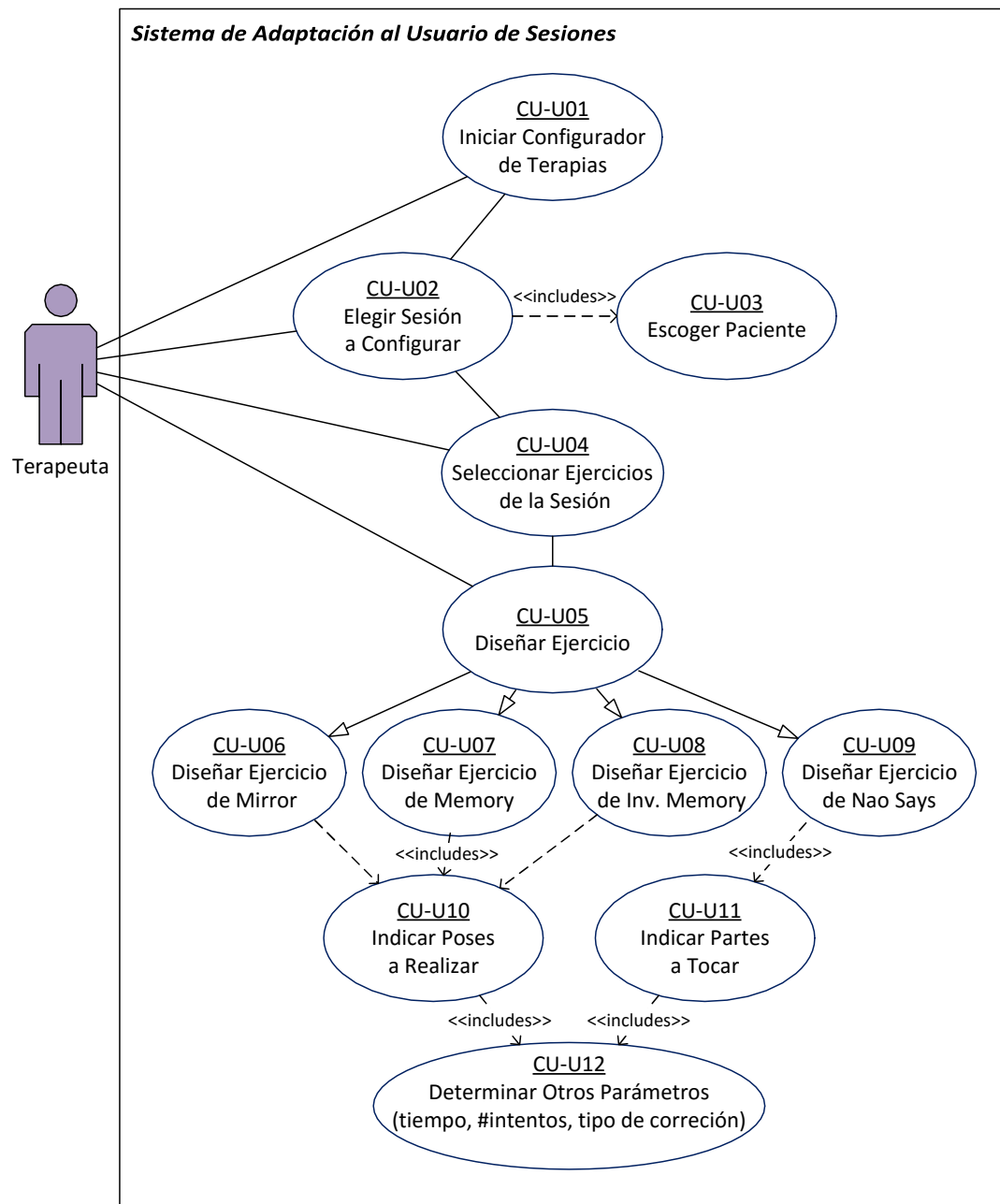


Tabla 4.14: Diagrama de Casos de Uso DCU-03.

4.4. Requisitos

En ingeniería, un requisito de sistema es una necesidad documentada sobre la funcionalidad, la forma o el contenido de un sistema software concreto, por lo que determinan qué debe hacer un sistema, pero no el cómo hacerlo, ya que dicha tarea pertenece a la fase de diseño. Por otro lado, los requisitos se clasifican en requisitos funcionales, los cuales indican las funciones que el sistema debe llevar a cabo, y requisitos no funcionales, que muestran las diferentes restricciones del sistema. Los requisitos no funcionales, a su vez, pueden ser de rendimiento, seguridad, implantación o disponibilidad.

Así pues, en este apartado se realizará la especificación de requisitos del sistema, a través de la cual se proporciona una descripción completa del comportamiento del sistema desarrollado. Esta especificación, junto a los casos de uso expuestos en la sección 4.3, son la base del diseño de los componentes del sistema desarrollados, por lo que su definición correcta es clave en este proceso.

Los requisitos están organizados en tablas, constando cada una de estos elementos:

- IDENTIFICADOR: R-Mxx – Nombre, donde:
 - 'R': significa que es un requisito;
 - 'M': es el módulo o componente involucrado, pudiendo ser éste:
 - 'V' si está relacionado con el reconocimiento de poses de Vision;
 - 'P' si es con la planificación de sesiones;
 - 'U' si trata la adaptación al usuario; y xx es el número de escenario.
 - Nombre: es el título descriptivo del requisito.
- TIPO: tipo de requisito especificado, funcional o no funcional.
- FUENTE: fuente del requisito, si el alumno, el tutor o los terapeutas entrevistados.
- NECESIDAD: informa sobre la importancia del requisito para el usuario.
- PRIORIDAD: indica la importancia del requisito para el desarrollador.
- ESTABILIDAD: tiempo de vigencia del requisito en el sistema.
- DESCRIPCIÓN: Breve descripción sobre propio requisito.

ID: R-V01 ~ Recopilación de Información de la Kinect v2			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Tutor
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-Vxx, E-Pxx, E-U01		
DESCRIPCIÓN:	El sistema debe recoger la información proporcionada por el sensor de movimiento Kinect v2 para poder detectar al paciente que vaya a llevar a cabo la sesión. Se reconocerá como paciente al usuario más cercano al sensor de entre todas las personas que pueda haber delante.		

Tabla 4.15: Requisito del Sistema R-V01.

ID: R-V02 ~ Generación de Modelo Antropométrico			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-Vxx, E-Pxx, E-U01		
DESCRIPCIÓN:	Tras detectar a un paciente o usuario, con la información dada por la Kinect, se generará un modelo biomecánica o antropométrico que contenga los ángulos articulares de acuerdo al conocimiento experto de los terapeutas.		

Tabla 4.16: Requisito del Sistema R-V02.

ID: R-V03 ~ Comprobación de Similitud entre Poses			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-Vxx, E-Pxx, E-U01		
DESCRIPCIÓN:	El sistema deberá de poder calcular correctamente la similitud entre una pose solicitada al paciente y la realizada realmente por éste. De esta forma, en los ejercicios se decidirá si una pose se considera como aceptada o no.		

Tabla 4.17: Requisito del Sistema R-V03.

ID: R-V04 ~ Comprobación de Tocamiento de Parte del Cuerpo			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Media	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P05		
DESCRIPCIÓN:	La plataforma podrá hallar la distancia entre cualquiera de las dos manos del paciente a diferentes partes de su cuerpo como: cabeza, hombros, codos, muñecas, estómago o caderas. Así, será capaz de decidir qué parte del cuerpo se está tocando el paciente en un momento dado.		

Tabla 4.18: Requisito del Sistema R-V04.

ID: R-V05 ~ Adición de Nuevas Poses al Catálogo			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Baja	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-V03, E-U01, E-U02		
DESCRIPCIÓN:	El sistema permitirá a los terapeutas incluir nuevas poses en el catálogo, con el fin de luego estar disponible al configurar sesiones de terapia.		

Tabla 4.19: Requisito del Sistema R-V05.

ID: R-V06 ~ Monitorización de Ángulos Articulares			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-V02, E-V03		
DESCRIPCIÓN:	El componente de <i>Vision</i> ofrecerá una interfaz gráfica con la que monitorizar a los usuarios detectados por el sensor. Esta pantalla ofrecerá información sobre el valor de los ángulos articulares calculados en el modelo.		

Tabla 4.20: Requisito del Sistema R-V06.

ID: R-V07 ~ Interfaz para la Adición de Nuevas Poses			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Media	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-V03		
DESCRIPCIÓN:	La interfaz gráfica de <i>Vision</i> incluirá un apartado en el que se podrán añadir nuevas poses al catálogo tras especificar algunos elementos: nombre de la nueva pose, articulaciones involucradas con sus correspondientes grados de importancia (significancias) y, si aplica, el identificador del paciente.		

Tabla 4.21: Requisito del Sistema R-V07.

ID: R-V08 ~ Retargeting de Pose en Robot en la Interfaz			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Tutor
NECESIDAD:	Baja	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-V03		
DESCRIPCIÓN:	Desde la interfaz de monitorización, el terapeuta también podrá observar cómo quedaría en el robot la pose a guardar. Con esto, se asegura que no haya poses que el robot no pueda realizar en el catálogo.		

Tabla 4.22: Requisito del Sistema R-V08.

ID: R-V09 ~ Cambios en Tiempo Real			
TIPO:	No Funcional (Rendimiento)	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema		
REFERENCIAS:	E-V02, E-V03		
DESCRIPCIÓN:	La obtención de datos de la Kinect y el cálculo del modelo antropométrico tendrá que ser lo suficientemente eficiente como para ofrecer actualizaciones casi a tiempo real en la interfaz de monitorización. Siempre y cuando los valores presentados puedan ser visibles para el terapeuta usuario.		

Tabla 4.23: Requisito del Sistema R-V09.

ID: R-V10 ~ Eficiencia de Comparación entre Poses			
TIPO:	No Funcional (Rendimiento)	FUENTE:	Tutor
NECESIDAD:	Media	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-V01, E-Pxx		
DESCRIPCIÓN:	La comparación entre pose solicitada y realizada deberá ser suficientemente		

ID: R-V11 ~ Inicio Independiente de <i>Vision</i>			
TIPO:	No Funcional (Implantación)	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-V02, E-V03		
DESCRIPCIÓN:	El componente de <i>Vision</i> deberá de poder ser iniciado por separado, sin		

ID: R-V12 ~ Consistencia del Catálogo de Poses			
TIPO:	No Funcional (Seguridad)	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-V03, E-U01, E-U02		

ID: R-P01 ~ Generalización de las Sesiones de Terapia			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P01		
DESCRIPCIÓN:	La plataforma deberá de permitir la ejecución de sesiones de terapia en las que se incluyan diferentes tipos de actividades, sin la necesidad de tener que interrumpir la interacción con el paciente parando la sesión.		

Tabla 4.27: Requisito del Sistema R-P01.

ID: R-P02 ~ Correcciones de Poses Incorrectas			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P01		
DESCRIPCIÓN:	El robot corregirá al paciente o le dará ciertas pistas cuando el paciente no realice correctamente una pose, siempre que no se haya alcanzado el máximo número de intentos.		

Tabla 4.28: Requisito del Sistema R-P02.

ID: R-P03 ~ Presentación de Ejercicios			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Baja	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P01		
DESCRIPCIÓN:	En las sesiones de terapia, antes de empezar un ejercicio, el robot deberá de presentar y explicar cada tipo de actividad cuando sea la primera vez que se realiza en una misma sesión.		

Tabla 4.29: Requisito del Sistema R-P03.

ID: R-P04 ~ Animaciones de Recompensa			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Alumno
NECESIDAD:	Media	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P01		
DESCRIPCIÓN:	Durante las sesiones de terapia, después de terminar cada ejercicio, el robot ejecutará una animación de recompensa aleatoria, cuya probabilidad de ser más divertida dependerá de lo bien que haya hecho el ejercicio el paciente.		

Tabla 4.30: Requisito del Sistema R-P04.

ID: R-P05 ~ Actividad de ‘Mirror’			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P02		
DESCRIPCIÓN:	La plataforma permitirá realizar ejercicios de ‘Mirror’ en el que el paciente		

ID: R-P06 ~ Actividad de ‘Memory’			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Alta
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P03		
DESCRIPCIÓN:	La plataforma permitirá realizar ejercicios de ‘Memory’, donde en varias rondas el paciente tendrá que recordar las cosas hechas por el robot para		

ID: R-P07 ~ Actividad de ‘Inverse Memory’			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Media	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P04		
DESCRIPCIÓN:	La plataforma permitirá realizar ejercicios de ‘Inverse Memory’, en el cual en varias rondas el paciente tendrá que recordar las cosas hechas por el robot		

ID: R-P08 ~ Actividad de ‘Nao Says’			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Media	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema.		
REFERENCIAS:	E-P05		
DESCRIPCIÓN:	La plataforma permitirá realizar ejercicios de ‘Nao Says’, juego que consiste en que el paciente debe tocar varias partes de su cuerpo a petición del robot.		

Tabla 4.34: Requisito del Sistema R-P08.

ID: R-P09 ~ Eficiencia de Planificación			
TIPO:	No Funcional (Rendimiento)	FUENTE:	Tutor
NECESIDAD:	Media	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema		
REFERENCIAS:	E-Pxx		
DESCRIPCIÓN:	El tiempo de planificación de una sesión de terapia deberá ser lo suficientemente reducido como para que la replanificación que puede acontecer en una sesión de terapia no afecte a la interacción entre robot y paciente, teniendo que mantenerse fluida en todo momento.		

ID: R-U01 ~ Personalización de Poses			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Media	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema		
REFERENCIAS:	E-V03, E-U01		
DESCRIPCIÓN:	El sistema permitirá la opción de almacenar poses especialmente adaptadas a determinados pacientes, las cuales luego podrán ser usadas durante las sesiones de terapia.		

ID: R-U02 ~ Adaptación/Configuración de Sesiones			
TIPO:	Funcional	FUENTE:	Terapeutas
NECESIDAD:	Alta	PRIORIDAD:	Media
ESTABILIDAD:	Durante toda la vida útil del sistema		
REFERENCIAS:	E-U02		
DESCRIPCIÓN:	<p>La plataforma permitirá a los terapeutas configurar las sesiones de terapia de acuerdo a las necesidades de cada paciente. Se podrán determinar los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ejercicios a realizar, indicando su orden y el tipo de actividad. • Para cada ejercicio, se señalarán las poses a imitar (postura del lado izquierdo y postura del lado derecho) o las partes del cuerpo a tocar, según cuál sea el tipo de juego elegido antes. • Para cada pose o parte del cuerpo, se podrá establecer el tiempo a aguantar, el número máximo de intentos y el tipo de corrección a hacer en cada intento. 		

Tabla 4.37: Requisito del Sistema R-U02.

Capítulo 5

Diseño e Implementación

Éste es el quinto capítulo del trabajo, en el cual se tratan las etapas de Diseño e Implementación del proceso de desarrollo. Por tanto, se describirán detalladamente las diferentes modificaciones realizadas sobre la antigua arquitectura de NaoTherapist, intentando dejar constancia del trabajo realizado para adaptar la plataforma a los requisitos del campamento de terapia intensiva, mostrados en el capítulo 4 anterior, de análisis (4).

En estas etapas del desarrollo es donde se empiezan a tomar decisiones claras sobre los procedimientos a través de los cuales desarrollar las funcionalidades planteadas en la fase de análisis. Así pues, aquí se define cómo han sido implementadas y cómo funcionan actualmente las nuevas partes de la plataforma en las que se ha trabajado. Además, es una fase donde se empiezan a ver los resultados prácticos reales del trabajo, por lo que se debe asegurar que se obtengan finalmente todos los requisitos solicitados por los terapeutas.

En primer lugar, el apartado 5.1 detalla todo el trabajo de desarrollo realizado para el nuevo sistema de reconocimiento de poses, incluido en el componente *Vision* de la arquitectura, el cual se basa en cuatro partes fundamentales: el diseño del nuevo modelo antropométrico articular, la nueva interfaz gráfica de *Vision*, la generación de un nuevo catálogo de poses y la implementación de un nuevo método de comparación entre poses. Segundo, en la sección 5.2 se presenta el también rediseñado modelo de planificación de las sesiones de terapia, haciendo una clara distinción entre los diferentes flujos del dominio. En último lugar, se trata el diseño referente al sistema de adaptación al usuario desarrollado (sección 5.3), en el que se exponen los diversos aspectos personalizables y configurables de una sesión de terapia con la nueva arquitectura.

5.1. Reconocimiento de Poses

La realización del nuevo sistema de reconocimiento de poses supuso un gran esfuerzo, tanto de análisis como de desarrollo. Dada la importancia de este sistema en la interacción entre robot y paciente durante las sesiones de terapia, la calidad del sistema debía ser alta en lo que se refiere a precisión de la información obtenida del sensor de movimiento Kinect v2 y a la exactitud del tratamiento de dichos datos para hacer las mediciones necesarias. De esta forma, se conseguiría alcanzar un buen reconocimiento de las poses solicitadas por el robot.

Por otra parte, el trabajo a realizar en el componente de *Vision* no solo consistía en la adición de nuevas funcionalidades, sino que además se debía integrar un nuevo sensor de movimiento al sistema, el cual, pese a ser una nueva versión del sensor que ya se usaba, suponía una gran cantidad de novedades y cambios. Así, basándose en este cambio de sensor, y en las opiniones dadas por varios terapeutas, se trabajó en el desarrollo de un nuevo modelo antropométrico con el que representar virtualmente las poses de los pacientes. Este nuevo modelo se describe en la sección 5.1.1.

Después, también era necesario diseñar una nueva interfaz gráfica para la captura de poses, que además incluyera una monitorización en tiempo real. Este trabajo realizado con la interfaz viene detallado en el apartado 5.1.2. Todo ello está muy relacionado con el proceso de captura de las poses propiamente dicho y la manera de almacenar las mismas en la Base del Conocimiento de la arquitectura, lo cual se verá en la sección 5.1.3. Por último, en el apartado 5.1.4 se describe la forma en que se realiza la comparación entre la pose solicitada por el robot, recuperada del catálogo de poses, y la realizada por el paciente, halla mediante la transformación de los datos obtenidos de la Kinect.

5.1.1. Modelo Antropométrico Articular

Para poder describir adecuadamente el nuevo modelo antropométrico empleado en el sistema NaoTherapist es necesario conocer los datos que proporciona el sensor Kinect v2 sobre los usuarios situados frente a la misma. De entre los diferentes datos que recoge el componente de la Kinect *WinKinectComp*, expuestos en la sección 3.2.2, para la generación del modelo corporal del paciente nos interesa uno en concreto, el módulo *MSKBody*.

Este módulo es el que proporciona los datos sobre las personas detectadas por el sensor, y la clase *TPerson* es la que da forma a estos datos, teniendo una instancia de esta clase para cada cuerpo humano detectado. Tal y como se puede ver en la figura 5.1, esta clase esta formada por: un identificador de la persona detectada, un conjunto de articulaciones (*Joints*), un estado de detección de la persona (*trackedState*) y una posición geométrica en coordenadas con origen en la cámara (*Position*). Cada una de las 25 articulaciones recogidas por la Kinect presenta información sobre su propia posición geométrica y el estado de detección, pudiendo ser detectado, no detectado o inferido. Además, como parte añadida de la nueva versión de la Kinect, también se proporcionan los estados de las manos del cuerpo (*rightHandState* y *leftHandState*),

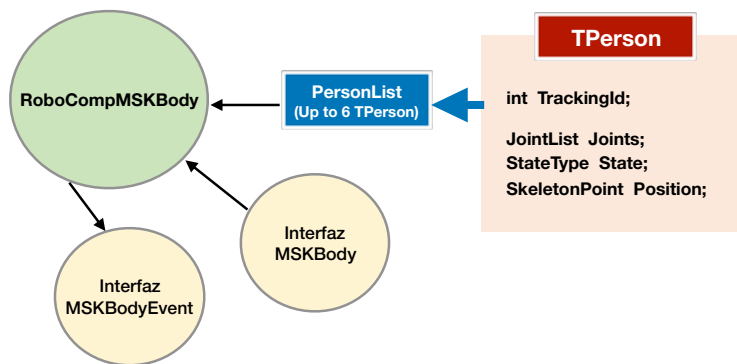


Figura 5.1: Modelo de Datos RoboCompMSKBody.

Cabe recordar que la comunicación entre componentes en la arquitectura NaoTherapist se realiza mediante ICE. Debido a esto, el componente *Vision*, para poder recibir correctamente los instancia de *TPerson* de la Kinect debe implementar su propia interfaz, denominada *KinectModel*. Esta interfaz que captura los datos recibidos de la Kinect en el lado de *Vision* es la que recoge el modelo antropométrico tratado en esta sección, por lo que *Vision* primero se encarga de transformar los datos recibidos, que luego son almacenados en la interfaz *KinectModel* con la forma del nuevo modelo de datos desarrollado.

Entonces, antes de describir los tipos de datos y estructuras recogidas en *KinectModel*, se intentará exponer la ideas en las que se basan el nuevo modelo antropométrico. La pose adoptada por el cuerpo humano en un momento dado puede definirse directamente por las posiciones de las articulaciones que componen el mismo, tal y como la Kinect devuelve los datos. Sin embargo, esta definición de la pose no es completa para los intereses de los terapeutas ocupacionales, cuyo trabajo suele realizarse sobre los rangos de movimiento articular.

Los movimientos articulares son los movimientos que puede realizar un cuerpo humano cuyo centro se encuentra en una articulación concreta, y sus rangos vienen definidos por los ángulos mínimos y máximos que forma la correspondiente articulación con sus articulaciones adyacentes [Kapandji et al., 1988] (ver figura 5.2). Entonces, para calcular los ángulos articulares simplemente bastaría con crear dos segmentos, uno por cada par de articulaciones adyacentes, y calcular el ángulo resultante entre ellos usando dichos segmentos como vectores.

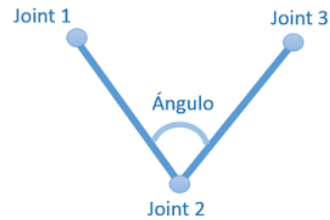


Figura 5.2: Definición de Ángulo Articular.

Sin embargo, una articulación no se define solamente por un único ángulo articular, sino que son varios los ángulos articulares que describen por completo el estado de una articulación determinada, al tener ésta varios movimientos distintos sobre los diferentes planos o ejes corporales [Kapandji et al., 1988] (representados en la figura 5.3). Además, el número de movimientos articulares de cada articulación es variante en función de los grados de libertad que posee cada una.

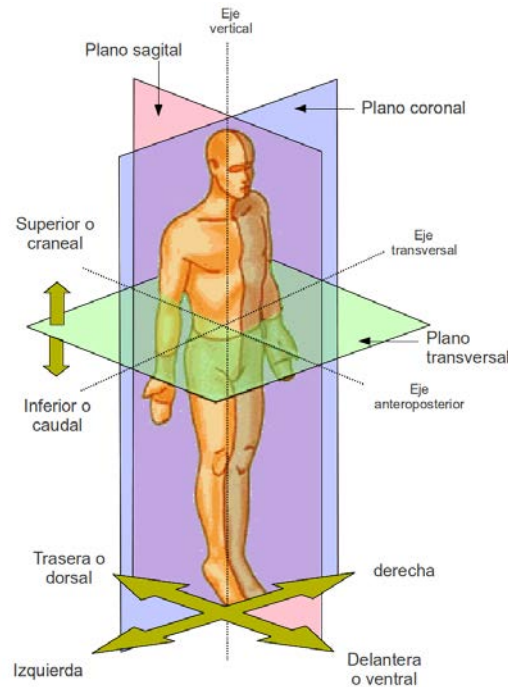


Figura 5.3: Definición de los Planos Corporales.

Por tanto, la manera de calcular los ángulos de los movimientos articulares de estas articulaciones que poseen múltiples grados de libertad, como el hombro, se halla con la intersección de los segmentos articulares mencionados anteriormente con el vector normal del respectivo plano corporal sobre el que tiene lugar el correspondiente movimiento. Todo este cálculo de la intersección entre planos y segmentos de una articulación se puede reducir a una proyección de las tres dimensiones que forman la posición geométrica en tan solo dos dimensiones; las dos dimensiones con las que quedarse en la proyección dependen del plano corporal referido, eliminándose en el plano sagital la dimensión dada por el eje 'X', en el plano coronal eliminando el eje 'Z', y en el plano transversal el eje 'Y'.

No obstante, los movimientos de algunas articulaciones son mucho más sencillos y no necesitan de todo este proceso, como el codo, en el que para calcular su ángulo de flexión-extensión se debe emplear el cálculo del ángulo en tres dimensiones entre dos segmentos (sin tener en cuenta los planos corporales), y su ángulo de rotación se calcula observando la posición de la muñeca respecto al resto del cuerpo, ya que cuando parece que rotamos la muñeca lo que en realidad se rota es el codo.

Toda esta teoría puede verse mejor con un ejemplo práctico. Por ejemplo, se coge la articulación del hombro, una de las articulaciones con mayor grado de libertad, la cual puede realizar movimientos de flexión-extensión en el plano sagital, movimientos de rotación o flexión-extensión horizontal en el plano transversal, y movimientos de abducción-aducción en el plano coronal. En la figura 5.4 puede verse cómo cada movimiento se observa desde una perspectiva

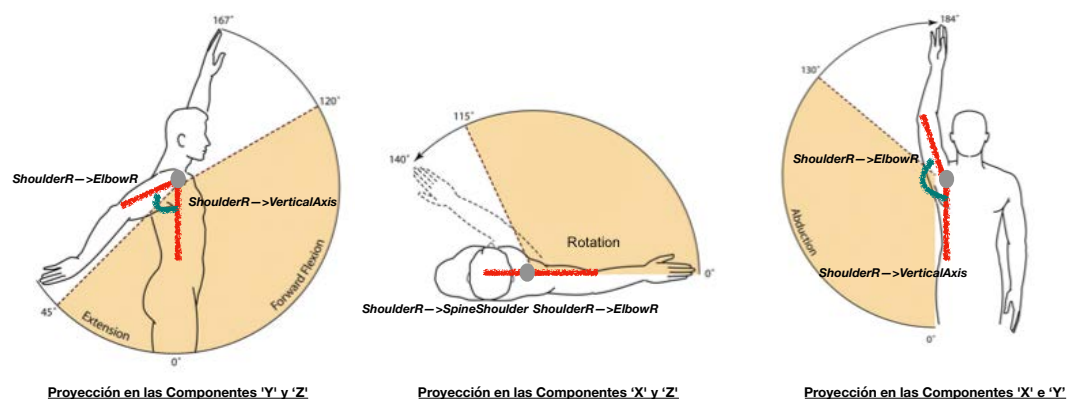


Figura 5.4: Movimientos Articulares del Hombro y el Cálculo de sus Ángulos.

Tras explicar esto último, ahora solo queda definir los movimientos de cada articulación, el tipo de cálculo necesario para hallar el correspondiente ángulo y los segmentos participantes en dicho cálculo, terminando de describir con ello el nuevo modelo antropométrico. De esta forma, todos estos cálculos se realizan para representar biométricamente al usuario detectado más cercano a la cámara, que será aquel que lleve a cabo la sesión de terapia.

- **Cuello:** para el cálculo de sus ángulos se sigue la estrategia de proyección en el plano, usando los vectores *Neck-Head* y *Neck-SpineShoulder*.

Flexión/Extensión: mover la cabeza adelante y atrás, en el Plano Sagital (Y,Z).

Abducción/Aducción: movimiento lateral, a lo largo del Plano Coronal (X,Y).

Rotación: movimiento de rotación de la cabeza en el Plano Transversal (X,Z).

- **Hombro:** ya definido en el ejemplo anterior.

Flexión/Extensión: bajar y subir el brazo en el Plano Sagital.

Abducción/Aducción: acercar y alejar el brazo del tronco en el Plano Coronal.

Rotación: acercar y alejar el brazo del tronco desde una perspectiva Transversal.

- **Codo:** el cálculo de los ángulos del codo se realiza de forma diferente, como ya se ha mencionado.

Flexión/Extensión: acción de doblar y estirar el codo. Se calcula el ángulo tridimensional formado entre los vectores *Elbow-Shoulder* y *Elbow-Wrist*.

Pronación/Supinación: rotación del codo sobre su eje. Se calcula el ángulo tridimensional formado entre los vectores *Hand-Wrist* y *Hand-Thumb*.

- **Muñeca:** se emplea la proyección de los vectores *Wrist-Elbow* y *Wrist-Hand*.

Flexión/Extensión: doblar y estirar la muñeca, en el Plano Sagital.

Desviación: movimiento ladeado de la muñeca en el Plano Transversal.

- **Tronco:** aquí también se usa la proyección en los planos de los vectores *SpineBase-SpineMid* y *SpineBase-VerticalAxis*, excepto en el movimiento de rotación, donde se usan los vectores *SpineShoulder-Shoulder* y *SpineShoulder-SpineMid*.

Flexión/Extensión: acción de doblar y estirar el tronco en el Plano Sagital.

Flexión Lateral: acción de doblar el tronco a un lado en el Plano Coronal.

Rotación: movimiento de rotación del tronco sobre su eje (Plano Transversal).

- **Cadera:** en este caso, también se emplea la proyección de los vectores *Hip-Knee* y *Hip-SpineBase*. La rotación es diferente aquí, usando los vectores *Ankle-Hip* y *Ankle-Foot*.

Flexión/Extensión: mover la pierna adelante y atrás, a lo largo del Plano Sagital.

Abducción/Aducción: movimiento lateral de la pierna en el Plano Coronal.

Rotación: rotación de la cadera sobre su eje, visto desde el Plano Transversal.

- **Rodilla:** la rodilla es similar al codo, realizándose cálculos diferentes para cada movimiento.

Flexión/Extensión: movimiento de doblar y estirar la rodilla, cuyo ángulo se calcula tridimensionalmente con los vectores *Knee-Hip* y *Knee-Ankle*.

Rotación: movimiento sobre su propio eje. El margen de rotación de la rodilla es de solo 5°, por lo que se desprecia.

- **Tobillo:** en esta articulación tampoco se usa el método de proyección en planos.

Flexión/Extensión: doblado y estirado del tobillo cuyo ángulo es el tridimensional entre los vectores *Ankle-Knee* y *Ankle-Foot*.

Pronación/Supinación: movimiento lateral, calculado con el ángulo formado entre los vectores *Foot-VerticalAxis* y *Ankle-VerticalAxis*.

Con esto, se obtiene un modelo antropométrico de la posición adoptada por el usuario mucho más familiarizado con los conocimientos de los terapeutas, ya que la nomenclatura de los ángulos se basa en el correspondiente movimiento articular asociado. Gracias al cálculo de todos estos ángulos articulares puede distinguirse perfectamente una pose de otra, permitiéndose además calcular la distancia entre dos poses de la forma que se verá en el subapartado 5.1.4.

Entonces, una vez definido esto, ya solo queda implementar la interfaz KinectModel restante, para que a los datos recibidos de la Kinect se añada los del nuevo modelo antropométrico diseñado. Así, el componente *Vision*, al recibir un evento de llegada de datos de la Kinect, con el método de cálculo de la biométrica detallada antes (*getPersonBiometrics*) transforma estos datos en la estructura expuesta en la interfaz Kinect Model (ver figura 5.5). La nueva variable incluida en la clase *TPerson* es *jointAngles*, la cual es una lista de objetos de tipo *JointAngle*, que a su vez esta formado por: *StartSegment* (segmento inicial usado para el cálculo del ángulo), *EndSegment* (segmento final), *Plane* (plano corporal empleado), *Motion* (movimiento articular asociado al ángulo) y *Joint* (articulación correspondiente). Otras variables que forman parte de esta estructura de *JointAngle* son *Significance* y *Threshold*, cuyo uso de detalla en la sección 5.3.

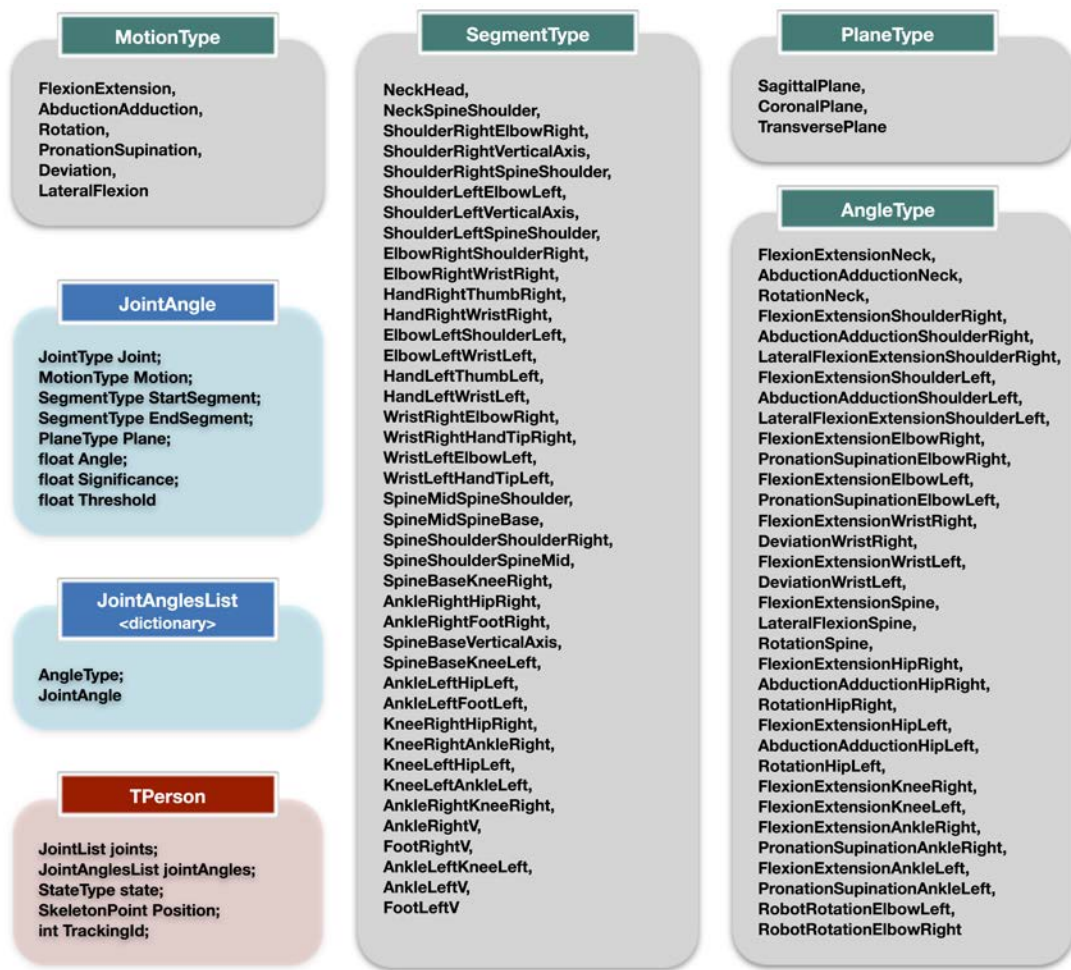


Figura 5.5: Elementos Añadidos a la Interfaz KinectModel.

5.1.2. Interfaz Gráfica de VisionComp

En el análisis de requisitos anterior (capítulo 4) se pudo observar cómo muchos terapeutas demandaban, además de la plataforma robótica con la que los niños pudieran realizar sesiones, una herramienta de monitorización de los mismos. Esto suponía el desarrollo de una nueva interfaz gráfica del componente de *Vision*, la cual dispusiera de diversas funcionalidades: monitorización en tiempo real, vista de los ángulos articulares del modelo, posibilidad de captar nuevas poses sin salir de dicha interfaz, y una opción de previsualizar la pose captada del usuario en el propio robot. La interfaz diseñada e implementada puede verse en la imagen de la figura 5.6, con el diseño gráfico de todas y cada una de las diferentes funcionalidades claramente marcado, las cuales son detalladas a continuación.

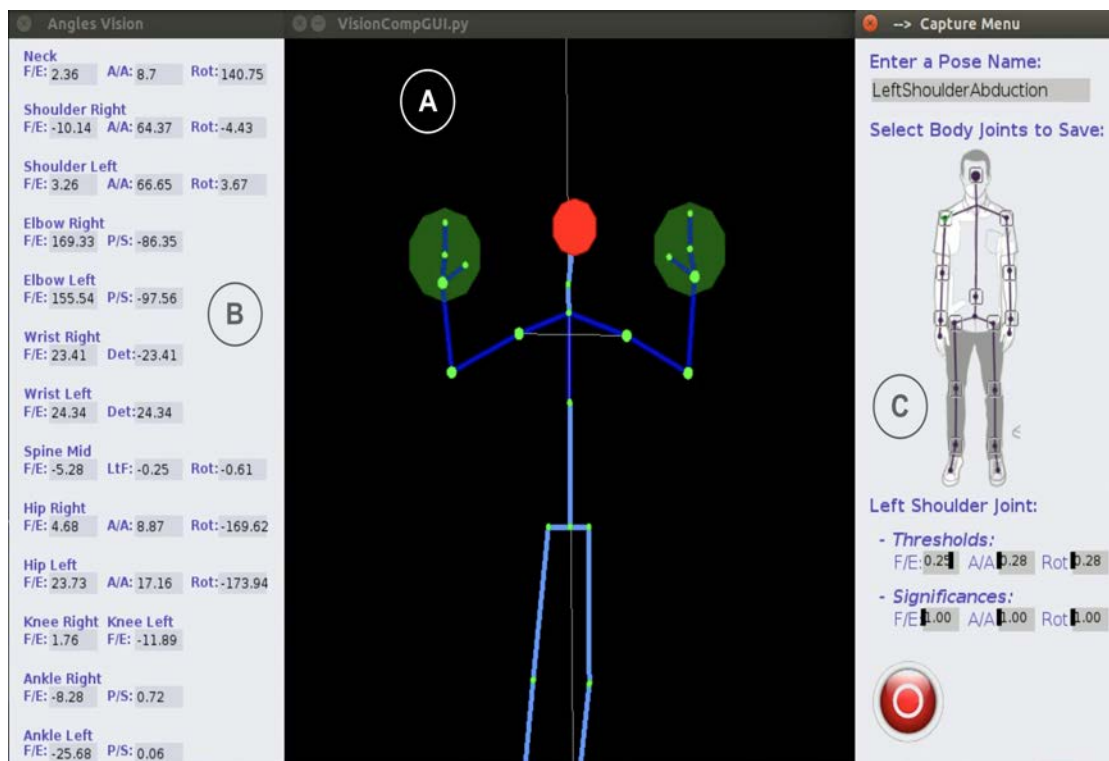


Figura 5.6: Interfaz Gráfica del Componente *Vision*.

La primera de estas funcionalidades, la monitorización del paciente, consiste en el seguimiento del modelo de esqueleto dado por la Kinect v2, debiendo estar representado gráficamente en la citada nueva interfaz (ver figura 5.6, parte 'A'). Como ya se ha visto, el sensor no proporciona una imagen del esqueleto, sino que solo se recibe información sobre las posiciones de las articulaciones (*joints*), y ahora también se dispone de la información calculada del modelo biométrico.

Por lo tanto, para la representación del esqueleto primero se obtienen las posiciones de las articulaciones del usuario detectado más cercano al sensor, y se dibujan puntos que actúan como dichas articulaciones, cuyas posiciones son normalizadas antes respecto a la posición de la articulación del tronco (*Spine*), usando ese punto como origen de coordenadas (centro de la pantalla). De esta manera, la representación gráfica del esqueleto es siempre la misma independientemente de la distancia del usuario respecto a la cámara, pudiendo éste además moverse por la sala siempre que esté dentro del rango de detección. Luego, se unen las articulaciones del cuerpo con segmentos entre aquellas que son adyacente, como codo con hombro o cuello con cabeza. Así, se obtiene un esqueleto con forma humana con el que se monitorizan en tiempo real los movimientos del usuario detectado.

Otra de los elementos que ofrece la interfaz es una vista con los valores de todos los ángulos articulares. Así, a la izquierda de la pantalla de monitorización, se presenta una sección que contiene un conjunto de casillas, cada una de las cuales corresponde a un movimiento articular concreto, de la articulación indicada (ver figura 5.6, parte 'B'). Todos estos ángulos son calculados en cada evento de recepción de datos por parte de la Kinect, por lo que para evitar excesivos retrasos en la monitorización del usuario, éstos debían ser lo más eficientes posible. No obstante, no se hallaron problemas en esto, puesto que inicialmente los ángulos se actualizaban cada vez que se recibía un evento de datos de la Kinect (30 veces por segundo), pero las actualizaciones eran tan rápidas que los valores no eran visibles. Debido a esto, se podía concluir que los cálculos era lo suficientemente rápidos como para no afectar al seguimiento del usuario, y se optó por realizar 3 actualizaciones por segundo de los valores de los ángulos articulares, de forma que estos fueran fácilmente visibles.

Añadido a todo esto, se encuentra el proceso de captura de nuevas poses para el catálogo, para lo cual era necesaria una herramienta de fácil uso. Finalmente, se decidió incluir esta herramienta en la propia interfaz gráfica de *Vision*, en una sección a la derecha de la pantalla de monitorización (ver figura 5.6, parte 'C'). En primer lugar, existe un formulario que debe ser rellenado antes de poder capturar una pose. El identificador de la pose se rellena automáticamente a partir del último 'id' hallado en el catálogo, aunque puede ser modificable. Además, se indica un nombre de la pose y las articulaciones a incluir en la definición de la pose, seleccionables mediante casillas en un dibujo del esqueleto del cuerpo humano dado por la Kinect. Al marcar cada una de estas casillas, se despliega una subsección en la que se indican los valores de significancia (*significance*) y umbral (*threshold*), cuya función se detalla en la sección 5.3 de este capítulo.

Tras completar esto y comprobar que la persona detectada adopta la pose deseada, puede pulsarse el botón de grabación para capturar la pose hecha por el usuario y almacenarla en el catálogo de la forma descrita en el siguiente subapartado (5.1.3). De forma previa a pulsar el botón de grabación, también se incluye la opción de probar cómo queda la pose en el robot. Esto se hace pulsando el botón que hay al lado con la cara, el cual activa la función de *retargeting* con la que el robot (o su virtualización en caso de estar desconectado) imitan la pose del usuario detectado con el sensor Kinect. Este método de traducción de la pose es necesario debido a las particulares características de las articulaciones del robot, que no son iguales a las del ser humano, y su uso también se encuentra en la ejecución de poses del catálogo durante las sesiones de terapia. Su implementación se incluye en el componente *NaoComp* del robot, y su diseño se realizó mediante un ajuste fino, haciendo diferentes pruebas sobre las posibles poses requeridas que luego se iban corrigiendo poco a poco.

5.1.3. Catálogo de Poses

El catálogo de poses pertenece al componente *Knowledge Base* (Base del Conocimiento) de la arquitectura NaoTherapist. Consiste básicamente en un fichero XML (*Extensible Markup Language*) donde se almacenan las poses capturadas mediante la interfaz gráfica de *Vision* expuesta anteriormente, con el objetivo de luego poder ser recuperadas para emplear esas mismas poses en los ejercicios de rehabilitación diseñados en una sesión de terapia.

En el almacenado de estas poses se ha intentado preservar la estructura marcada en el nuevo modelo antropométrico, descrito en el apartado 5.1.1. Este es uno de los motivos por los que se usó el lenguaje XML para el fichero, puesto que otorga una mayor flexibilidad a la hora de guardar y recuperar datos que tienen una estructura muy concreta, como es el caso. Otro motivo fue la existencia de una gran cantidad de librerías en Python con métodos ya implementados que permiten recuperar la información estructurada en forma de árbol de estos ficheros sin necesidad de crear procedimientos propios. En un principio, existía un fichero de catálogo de poses común para todos los pacientes, pero esto luego cambió tal y como se verá en la sección 5.3.

Como durante el proceso de captura de las poses, visto antes, se permite seleccionar aquellas articulaciones involucradas en una pose despreciando el resto, la definición de una pose dentro del catálogo no tiene por qué incluir todas y cada una de las articulaciones del cuerpo humano. Sin embargo, al seleccionar una articulación, necesariamente sí que deben incluirse todos sus correspondientes movimientos articulares, con los valores de sus respectivos ángulos. En esta estructura también se incluye información relativa a la ejecución a bajo nivel de la pose, incluyendo los discursos que puede mencionar el robot al ejecutar la pose. En la figura 5.7 se muestra la estructura que posee una postura en este fichero con un ejemplo real.

```
<posture id="r3" name="arms_towards" threshold="0.15">
  <ShoulderLeft>
    <FlexionExtension>
      <AngleType>FlexionExtensionShoulderLeft</AngleType>
      <AngleValue>92.66</AngleValue>
      <Significance>1.00</Significance>
    </FlexionExtension>
    <AbductionAdduction>
      <AngleType>AbductionAdductionShoulderLeft</AngleType>
      <AngleValue>0.17</AngleValue>
      <Significance>0.00</Significance>
    </AbductionAdduction>
    <Rotation>
      <AngleType>LateralFlexionExtensionShoulderLeft</AngleType>
      <AngleValue>46.01</AngleValue>
      <Significance>1.00</Significance>
    </Rotation>
  </ShoulderLeft>
  ... (Possible to Add Other Joints)
  <SpeechBilateral> lets go point both hands towards the front like
  superman </SpeechBilateral>
</posture>
```

Figura 5.7: Definición XML de una Postura.

5.1.4. Comparación entre Pose Esperada y Capturada

Ahora, es el turno de describir el método de comparación de poses o de cálculo de la similitud existente entre dos poses dadas. Este método `comparePose` forma parte del componente *Vision*, aunque siempre es llamado por el componente *Executive*, en el momento en que se ejecuta la acción de planificación de medio nivel `check-pose`, lo que a bajo nivel se traduce en sucesivas comprobaciones de que la pose solicitada y la ejecutada por el paciente son similares.

En cada una de estas comprobaciones, para hallar la distancia entre ambas poses, se acude a la función `comparePose` citada. Cabe decir, además, que las mencionadas comprobaciones de bajo nivel se realizan por cada brazo, debiendo aceptarse ambos brazos para aceptar la pose entera. Por tanto, se deben realizar cálculos de la distancia para cada brazo por separado.

El resultado devuelto por este método es un objeto de tipo *Comparison*, cuya definición forma también parte de la interfaz KinectModel. En la figura 5.8 pueden verse las diferentes estructuras que conforman los resultados que `comparePose` calcula y devuelve. La estructura *Comparison* resultante contiene como variables *rightArmDistance*, *leftArmDistance*, *bodyDistance*, *AnglesDistancesList* y *JointsDistancesList*.

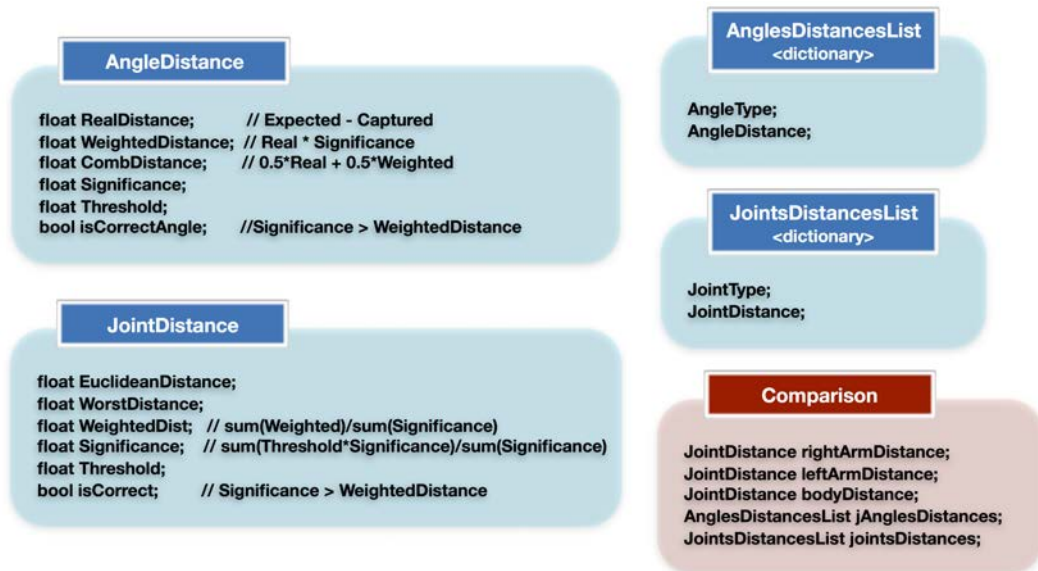


Figura 5.8: Modelo de los Resultados de Comparación.

La estructura *AngleDistance* almacena las diferencias entre ángulos articulares calculadas de diferentes maneras. Dado que corresponde a la distancia existente entre dos ángulos correspondientes, una instanciación de esta estructura corresponde a un único movimiento articular. Así, primero se halla la diferencia real entre ángulo esperado y capturado (*RealDistance*). En segundo lugar, a partir de la multiplicación del valor anterior y de la significancia del correspondiente movimiento articular, se calcula la distancia ponderada entre ambas poses (*WeightedDistance*). Por si acaso, se incluye un tercer cálculo que realiza una media de los dos valores hallados previamente (*CombDistance*). Por último, se determina si el ángulo articular referido sería aceptado en la comprobación, es decir, si el valor de *WeightedDistance* se encuentra dentro del rango determinado por el umbral (*isCorrectAngle*). Estos mismos cálculos se realizarían para todos los ángulos articulares que definen la postura esperada, recuperados del catálogo de poses, y se almacenan en el diccionario *AnglesDistancesList* por clave de *AngleType*.

Por otro lado, se diseñó la estructura *JointDistance*, la cual permite combinar en un solo objeto todos los resultados previamente calculados para los ángulos articulares y guardados en estructuras del tipo *AngleDistance*. Esta estructura posee diferentes variables, cada una de las cuales guarda el valor resultante de las diversas formas de combinación. La primera forma (*EuclideanDistance*) consiste en el cálculo de la distancia euclídea entre todos los ángulos articulares esperados y capturados que forman una articulación en su conjunto. Otra forma de agrupar la diferencia por articulación consiste simplemente en coger la mayor distancia entre ángulos articulares (*WorstDistance*), quedándose así con el peor resultado de los movimientos articulares pertenecientes a una articulación. En último lugar, está el cálculo de la distancia ponderada (*WeightedDist*), en la que se realiza una media de las diferencias de los ángulos ponderada por los valores de sus correspondientes significaciones. Se hacen los cálculos necesarios para obtener una instancia de esta estructura por cada articulación que define la pose esperada; instancias que luego se guardan en el diccionario *JointsDistancesList* por clave *JointType*.

Las tres primeras variables (*rightArmDistance*, *leftArmDistance* y *bodyDistance*) de la estructura *Comparison* contienen el resultado conjunto de las diferencias entre los ángulos del brazo derecho, brazo izquierdo y ambos brazos respectivamente. Empleando los mismos métodos de cálculo que los expuestos para la estructura *JointDistance*, y por tanto usando dicho tipo de estructura, se combinan los resultados por diferentes grupos de articulaciones. El primer paso de esta combinación de las diferencias resultantes se realiza agrupando movimientos por articulaciones asociadas, que luego vuelven a ser agrupados por brazo izquierdo o brazo derecho. Para hallar el resultado de la tercera variable, esta misma agrupación se vuelve a realizar entre los objetos de brazos derecho e izquierdo, formando así el objeto *bodyDistance*.

5.2. Planificación de Sesiones de Terapia

Esta sección tratará de describir el modelo de planificación de las sesiones de terapia desarrollado, como parte nueva del sistema NaoTherapist y con el que se pueden integrar varias actividades en una misma sesión en forma de juegos. Con este nuevo dominio de planificación, de cara al campamento de terapia intensiva, se ha mejorado considerablemente el diseño de las sesiones de terapia, dando la posibilidad de realizar una mayor variedad de ejercicios, al mismo tiempo que se da una mayor fluidez a la interacción entre paciente y robot.

Este nuevo modelo de sesiones de terapia con NaoTherapist se representa mediante el dominio y el problema de la tarea de planificación en el nivel medio de la arquitectura. El dominio se expresa empleando el lenguaje PDDL visto en la sección 3.3.2, y contiene todas las posibles acciones que pueden llevarse a cabo en una misma sesión de terapia con la plataforma. Por otro lado, los problemas, también representados con PDDL, incluyen instanciaciones concretas de sesiones ya configuradas, teniendo definidos los ejercicios específicos a realizar en ellas de entre todos los posibles.

En la primera subsección (5.2.1), se detalla el flujo de ejecución general de toda sesión de terapia, independientemente de los tipos de actividades que se realicen en ésta, puesto que, tal y como se verá más adelante, existen partes comunes en la ejecución de los ejercicios, además de otras acciones relacionadas con el inicio y el final de las sesiones. A continuación, en el subapartado 5.2.2, se describen los flujos de ejecución de cada una de las nuevas actividades diseñadas, recordando igualmente lo visto en el capítulo 4 para explicar en qué consisten estos juegos. Con ello, se expondrán todas las posibles acciones a planificar en una sesión de terapia, formando junto a los predicados y funciones implementados el dominio de planificación.

Luego, para hacer funcionar todos estos modelos de juegos en una sesión de terapia real, en el componente *Executive* de la arquitectura NaoTherapist, se traducen todas estas acciones de medio nivel en acciones de bajo nivel. Algunas de estas acciones de bajo nivel pueden ser aquellas que el robot puede realizar directamente como moverse a una postura concreta, ejecutar una animación almacenada o pronunciarse un discurso pasado; acciones del robot a las que se accede mediante su interfaz *NAOQi*. Otras acciones que se realizan en este bajo nivel son las llamadas a métodos de otros componentes de la arquitectura, como las funciones de *Vision* con las que obtener las mediciones antropométricas del paciente y luego realizar las comprobaciones necesarias de sus poses imitadas.

5.2.1. Generalización del Dominio

En este nuevo modelo de sesión, las acciones están expresadas de forma generalizada usando variables, por lo que su definición es independiente de las actividades y poses incluidas concretas incluidas en una sesión de terapia específica. Así, en lugar de usar un dominio de planificación diferente para cada actividad, se ha conseguido integrar todos los juegos o tipos de ejercicios, tanto los nuevos como los adaptados, en un mismo dominio.

Esto permite que la posterior planificación de cada sesión de terapia sea realizada empleando el mismo dominio, lo que proporciona una solución robusta y flexible donde la información sobre todas las posibles acciones involucradas en una sesión se encuentra centralizada en el mismo fichero de dominio.

Además, esta solución integradora, frente a la opción de un dominio por cada actividad, ofrece otras ventajas en la interacción robot-paciente, dando a ésta una mayor fluidez por el desarrollo de una sesión ininterrumpida con diversos tipos de ejercicios, y una mayor facilidad de configuración de las sesiones, no teniendo que luego reunir varios problemas con sus respectivos planes en uno solo para poder llevar a cabo la sesión.

La figura 5.9 muestra el flujo de ejecución general de un plan, generado por el modelo de dominio aquí planteado, para una sesión de terapia. Este flujo se compone de cuatro fases principales: bienvenida, entrenamiento, recompensa y despedida.

Toda sesión de terapia siempre empezará con una **Fase de Bienvenida** (*Welcome Phase*). Perteneciendo a esta fase, se encuentran cuatro acciones que el robot puede realizar:

1. **Detección de la presencia del paciente** (*detect-patient*) delante del robot y el sensor, habiendo sido detectado por la Kinect v2.
2. **Identificación del paciente** (*identify-patient*), creando su modelo corporal y accediendo a su información personal, como el nombre o la edad.
3. **Saludo al paciente** (*greet-patient*) identificado por parte del robot.
4. **Comienzo del entrenamiento** (*start-training*), que normalmente involucra algún discurso que indica que el entrenamiento está a punto de comenzar.

Después de la bienvenida, viene la **Fase de Entrenamiento** (*Training Phase*). Para esta fase de entrenamiento, el flujo de ejecución general contiene una acción para introducir el ejercicio correspondiente, el conjunto de acciones correspondiente al tipo de actividad o juego a realizar durante el ejercicio, y otra acción para finalizar dicho ejercicio. A bajo nivel, las acciones de introducción (*introduce-exercise*) y finalización (*finish-exercise*) de un ejercicio corresponden a discursos adaptados a cada tipo de actividad.

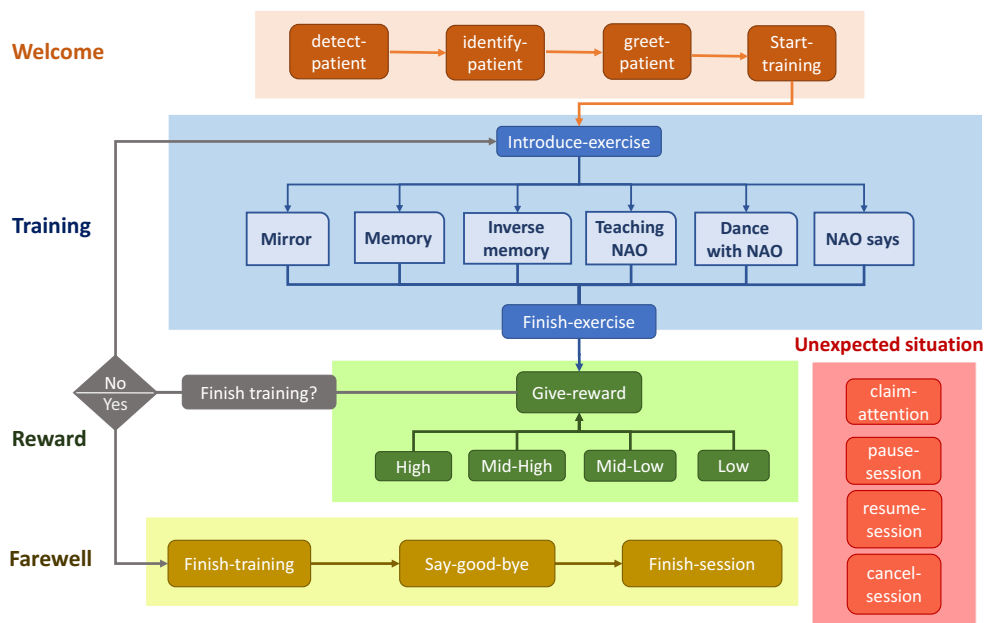


Figura 5.9: Flujo General del Dominio Integrador de Actividades.

Actualmente, las actividades definidas e integradas en el dominio son: *Mirror*, *Memory*, *Inverse Memory*, *Nao Says*, *Teaching Nao* y *Dancing with Nao*. Las dos últimas actividades son mencionadas aquí por primera vez en este trabajo, debido a que pertenecen al desarrollo de otra alumna como parte de su Trabajo de Fin de Grado y, como tal, no serán detallados en el presente documento. El flujo de ejecución para el resto de actividades será explicado en la siguiente subsección (5.2.2).

En el momento en que finaliza esta etapa de entrenamiento, tiene lugar la **Fase de Recompensa** (*Reward Phase*). La inclusión de esta fase permite al sistema proporcionar recompensas a los pacientes por el esfuerzo realizado tras cada ejercicio. Esta recompensa dada puede ser de diferentes intensidades (alta, media-alta, media-baja y baja) en función del paciente y su desempeño durante la actividad. Un ejemplo de una recompensa alta es la ejecución de una animación de baile o la narración de una historia divertida, mientras que una de intensidad baja sería simplemente un discurso motivador o una animación de relajación.

El desempeño del paciente se evalúa en base al número de correcciones realizadas por el robot durante el ejercicio o, dicho de otro modo, el número de veces que el paciente ha fallado en sus intentos de realizar correctamente las poses indicadas por el robot. Con esta contabilización del número de fallos, gracias a las replanificaciones que tendrían lugar al fallar, se calcula un porcentaje sobre el número total de intentos. El resultado de este cálculo es el que determina la intensidad de la recompensa, siendo alta si es menor del 25 %, media-alta si está comprendido entre el 25 % y el 50 %, media-baja entre 50 % y 74 %, y baja si es superior al 75 %.

Por otra parte, se ha ideado un nuevo sistema para la inclusión de animaciones como recompensas. Antiguamente, la animación final del ejercicio se encontraba marcada a bajo nivel de manera fija, ejecutándose siempre el baile de “La Macarena”. Luego, al incluir la posibilidad de realizar un mayor número de ejercicios por sesión, no tenía sentido alguno realizar siempre la misma animación, por lo que se realizarían nuevas animaciones de manera aleatoria dentro de cada categoría de intensidad. Sin embargo, también era necesario idear un sistema con el que no se repitiera ninguna animación en la misma sesión, creándose así una estructura en la que se guarda el nombre a bajo nivel de la animación, la etiqueta de intensidad asociada y otra etiqueta booleana que marca si ya ha sido ejecutada durante la sesión.

Así, antes de dar una recompensa, se selecciona aleatoriamente aquella animación con la etiqueta de la intensidad planificada cuya ejecución no haya sido realizada con anterioridad durante la sesión. Esta nueva funcionalidad mejoró drásticamente la interacción con el robot, teniendo una gran acogida por los niños participantes en el campamento de terapia intensiva, los cuales luego comentaban con sus compañeros las animaciones que les habían “tocado”.

En último lugar, muchos ejercicios, de distintos tipos o no, pueden ser incluidos en una misma sesión de terapia. Si se da ese caso, la sesión no entraría en la fase final tras dicha etapa de recompensa, sino que volvería a empezar con una nueva fase de entrenamiento. Por el contrario, si se trata del último ejercicio a realizar en la sesión, tras dar la recompensa al paciente se pasa a la **Fase de Despedida** (*Farewell Phase*).

Ésta sería la fase final de toda sesión de terapia, incluyendo por tanto las acciones **finish-training**, **say-good-bye** y **finish-session**, las cuales a bajo nivel consisten en una serie movimientos y discursos del robot orientados a despedir al paciente y decirle qué tal lo ha hecho durante la sesión. Algunos ejemplos de esto son decir adiós a la vez que se mueve la mano en señal de despedida, o decir lo cansado que está por el esfuerzo realizado mientras se pasa la mano por la frente simulando que el robot se seca el sudor.

5.2.2. Modelado de Nuevas Actividades

El trabajo realizado en la actualización de la planificación automática de sesiones de terapia incluida en la arquitectura NaoTherapist no solo consistió en desarrollar un nuevo dominio en el que se pudieran integrar varios ejercicios independientes en una misma sesión. También se debían diseñar nuevos juegos o actividades, junto con sus correspondientes acciones incluidas igualmente en el dominio de planificación integrado.

Estos nuevos cambios, incluidas las adaptaciones realizadas para los antiguos juegos del *Mirror* y el *Simón* y los nuevos diseños del *Inverse Memory* y el *Nao Says*, son detallados a continuación en sucesivos apartados dedicados a cada uno de ellos.

5.2.2.1. Mejoras en el Juego del Mirror

Además del diseño de nuevos tipos de actividades o juegos, también se trabajó en una mejora de la planificación del ejercicio del *Mirror*. Esta actividad consiste en que el robot ejerce de guía en una sesión normal de terapia, teniendo que mostrar diferentes poses al paciente que luego éste último debe intentar imitar. De forma similar a como lo haría un terapeuta real durante la rehabilitación, el robot debe corregir la posición del niño si la imitación no es satisfactoria, dadas sus limitaciones físicas.

Algunos de los cambios realizados en este sentido iban encaminados a solventar algunos de los problemas de integración de los diferentes tipos de actividades que presentaba la arquitectura anterior, con la cual no se podía combinar varios ejercicios en una sola sesión de terapia sin interrupciones en la interacción con el sistema. No obstante, esta mejora también permite ahora una mayor configurabilidad de las sesiones, otorgando a los terapeutas una mayor variedad de opciones para diseñar un ejercicio del *Mirror*; opciones que se verán con más detalle en el apartado 5.3.3 de este mismo capítulo.

Con el fin de conseguir todo esto, se propuso un nuevo flujo de acciones para esta actividad, el cual puede observarse en la figura 5.10, presentada a continuación. La primera acción en este flujo es **execute-pose**, la cual se ocupa de hacer que el robot realice la pose oportuna en cada momento del ejercicio, quedando el orden de las poses definido en el problema del dominio.

Luego, con **check-pose** se realiza la comprobación de la imitación hecha por el paciente. Siguiendo el flujo normal, se pasa a la acción "finish-pose" que marca como ejecutada y correctamente imitada la correspondiente pose para que no vuelva a repetirse y así volver al mismo proceso pero con la siguiente pose del ejercicio. Por el contrario, si el paciente no realiza correctamente la pose, a bajo nivel se introduce el predicado **correct-pose**, gracias a lo cual tiene lugar una replanificación con la que se determina la ejecución de la acción **correct-pose** que trata las indicaciones hechas por el robot para corregir la pose del niño. En caso de que se llegue al último intento para cierta pose y el paciente falle, la pose se da por buena, pasando por la acción **skip-pose**. Aquí puede verse cómo funciona la replanificación y su utilidad, cambiando el camino a seguir por el planificador en base a ciertas decisiones tomadas a bajo nivel e indicadas con la inclusión de un nuevo predicado.

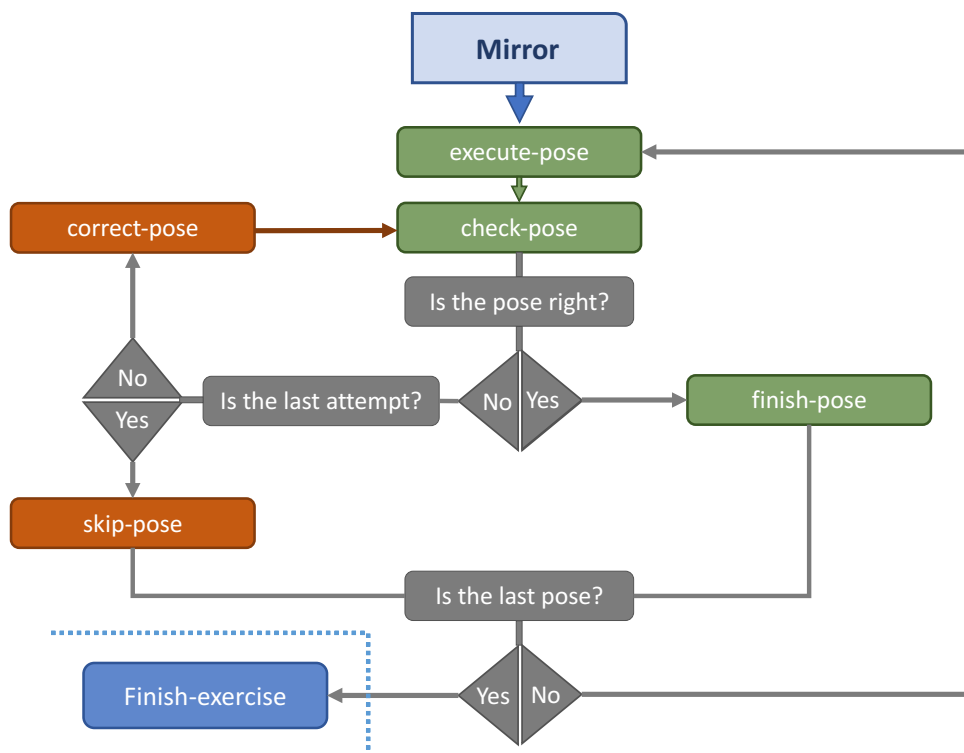


Figura 5.10: Flujo Específico del Juego *Mirror*.

5.2.2.2. Nuevo Diseño del Juego Memory (Antiguo Simón)

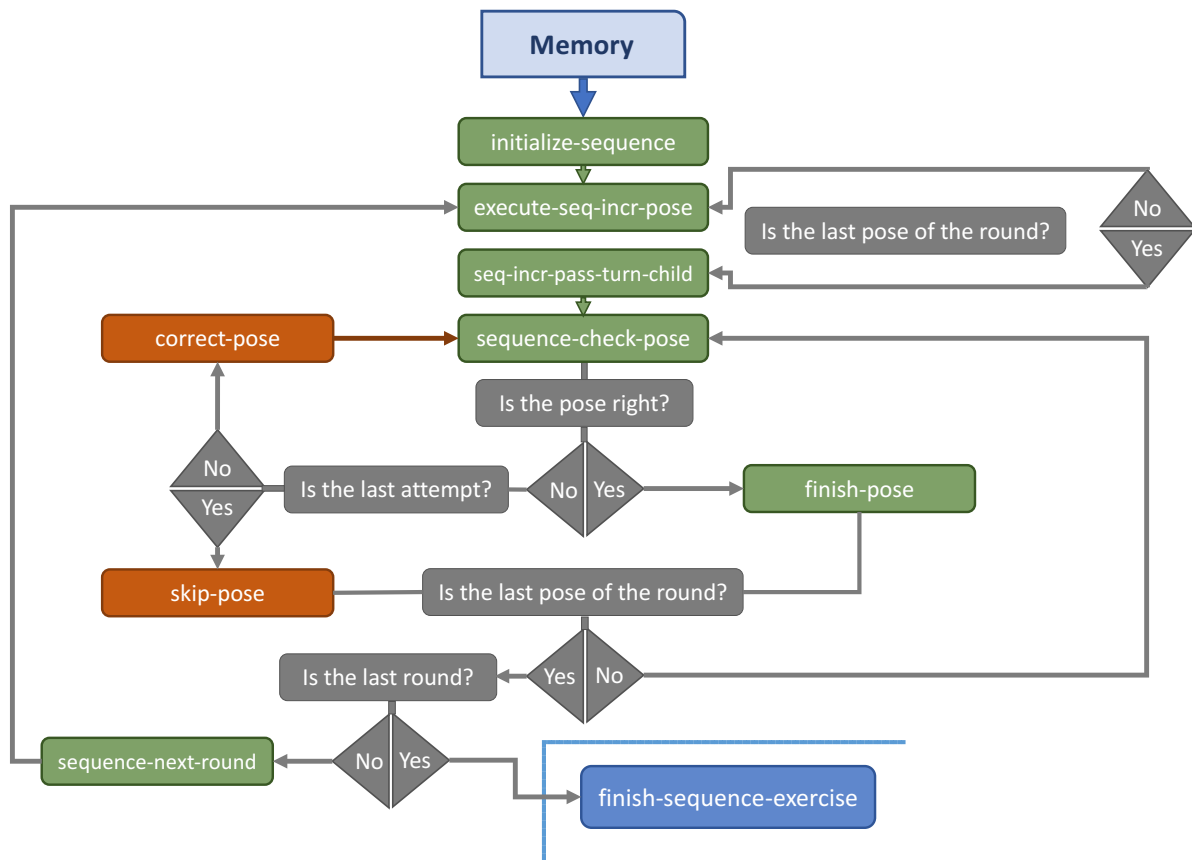
Añadido a las mejoras en el *Mirror*, se trabajó también en una completa actualización del juego del *Simón*, ahora denominado *Memory* bajo las indicaciones de los terapeutas, ya que es así como llaman al juego que realizan ellos mismos con los pacientes. En este juego, el robot debe realizar una secuencia de poses que luego el paciente debe recordar y realizar correctamente en el mismo orden.

Anteriormente, las actividades del *Mirror* y del *Memory* estaban representadas en el mismo fichero del dominio, pero no compartían ninguna acción, ni siquiera en el comienzo o el final de la sesión de terapia. Esto quiere decir que su integración en una misma sesión era muy costosa para la interacción entre robot y paciente, repitiéndose las fases de bienvenida y despedida al ejecutar los dos ejercicios en una sola sesión de terapia. Por este motivo, se trabajó en un rediseño completo de este juego.

Ahora, tras el trabajo realizado, los flujos de ejecución de ambas actividades comparten muchas acciones, tal y como se puede ver en la representación gráfica del flujo del *Memory* incluida en la figura 5.11, llegando así a tener cinco acciones propias.

Primero, la acción de control `initialize-sequence` inicializa dos variables usadas como contadores para la correcta ejecución de las secuencias de poses en el transcurso del juego, uno para las poses ejecutadas y comprobadas en una ronda y otro para el número de rondas realizadas. Luego, gracias a la acción `execute-sequence-incr-pose`, en este juego el robot puede ejecutar todas las poses de la secuencia de una ronda una tras otra sin esperar tras cada una a que el paciente la imite. Después de asegurar que el robot realiza todas las poses de la ronda a recordar con la acción propia `sequence-incr-pass-turn-to-child`, otra acción llamada `sequence-check-pose` comprueba de una en una las poses que debe realizar el niño.

Todo el proceso de corrección de las poses ejecutadas por el paciente o la omisión de las mismas al llegar al número máximo de intentos, se realiza con las acciones compartidas con el *Mirror*. A continuación, `sequence-next-round` verifica si existen rondas restantes que jugar, volviendo a ejecutar este proceso con una ronda más. En cambio, si se ha llegado a la última ronda, la acción `finish-sequence-exercise` se encarga de dar por finalizado el ejercicio de *Memory*. Esta última acción es la que diferencia ambos flujos al realizar la planificación, gracias a la inclusión de un predicado que indica el tipo de ejercicio, conociendo así el planificador qué camino elegir.

Figura 5.11: Flujo Específico del Juego *Memory*.

5.2.2.3. Modelado del Juego *Inverse Memory*

El reajuste del juego del *Memory*, más tarde, motivó un nuevo tipo de ejercicio muy similar a éste. Se trata del juego *Inverse Memory*, en el que al igual que en el *Memory*, el robot muestra una serie de poses las cuales el paciente debe observar atentamente para luego reproducirlas, salvo que en esta ocasión la secuencia de poses debe hacerse en el orden inverso al hecho por el robot, y no en el mismo orden.

La representación de este nuevo juego en el dominio de planificación fue posible gracias a la implementación de tan solo dos acciones extra, tras lo desarrollado para los juegos del *Mirror* y el *Memory*, generándose así un nuevo posible flujo de ejecución. Dado que este juego es muy parecido al *Memory*, cambiando únicamente el orden de ejecución de las poses, sus flujos de ejecución también son casi idénticos (ver figura 5.11).

La única diferencia puede encontrarse en las acciones `execute-sequence-decr-pose`, que sustituye a su homóloga `execute-sequence-incr-pose`, y `sequence-decr-pass-turn-to-child`, que pasa a ocupar el lugar de `sequence-incr-pass-turn-to-child`. Con la primera acción, se consigue que el robot realice las poses en el orden inverso al indicado en la definición del problema, mientras que la segunda procura pasar el turno al niño cuando el robot ejecute todas las poses de la ronda, para luego poder ser comprobado que las realiza correctamente. De este modo, en la definición de este ejercicio se indican las poses en orden tal y como debería realizarlas el niño, por lo que realmente luego es el robot quien las hace en orden inverso, simulando así dicho juego fácilmente.

5.2.2.4. Modelado del Juego Nao Says

Otro juego diseñado específicamente para las terapias desarrolladas en HABIT (*Hand-Arm Bimanual Therapies*) junto a los terapeutas es el juego de *Nao Says*. Este juego es parecido al conocido juego de “Simón Dice”. En este juego, el robot toma el rol de “Simón”, mandando instrucciones al paciente, en forma de tocar una parte del propio cuerpo del niño (por ejemplo, Nao dice tócate un hombro) o adoptar una postura básica (Nao dice siéntate). Al igual que en el resto de juegos, si el paciente no realiza la instrucción debidamente, el robot le corrige de diferentes formas hasta hacerlo correctamente o llegar al máximo número de intentos, momento en el que se pasa a la siguiente instrucción.

Este juego se modela en el dominio con la creación de cinco nuevas acciones, generando con ellas un nuevo posible flujo de ejecución, mostrado en la figura 5.12. La estructura del flujo de ejecución es la misma que para el juego del *Mirror*, salvo que en esta ocasión todas las acciones empleadas son específicas de *Nao Says*, puesto que ahora se hace referencia a articulaciones (*joints*) y no a poses, debiendo entonces ser todas las acciones diferentes.

Para poder hacer esto, además de modelar el juego en el dominio, era necesaria una nueva forma de comprobar que se realizan las instrucciones de forma correcta. Así pues, en el módulo de *Vision* se incorporó una nueva funcionalidad relacionada directamente con este juego, en la que se calculan las distancias entre las principales partes del cuerpo (cabeza, hombros, codos, muñecas, estómago, caderas, rodillas y pies) y ambas manos del paciente. Gracias a esta nueva parte de la monitorización del paciente, puede averiguarse la parte del cuerpo tocada (aquella con menor distancia a cualquiera de las manos, dentro de límite máximo) y la mano concreta con la que ha sido tocada la parte (distinguiendo entre mano derecha y mano izquierda).

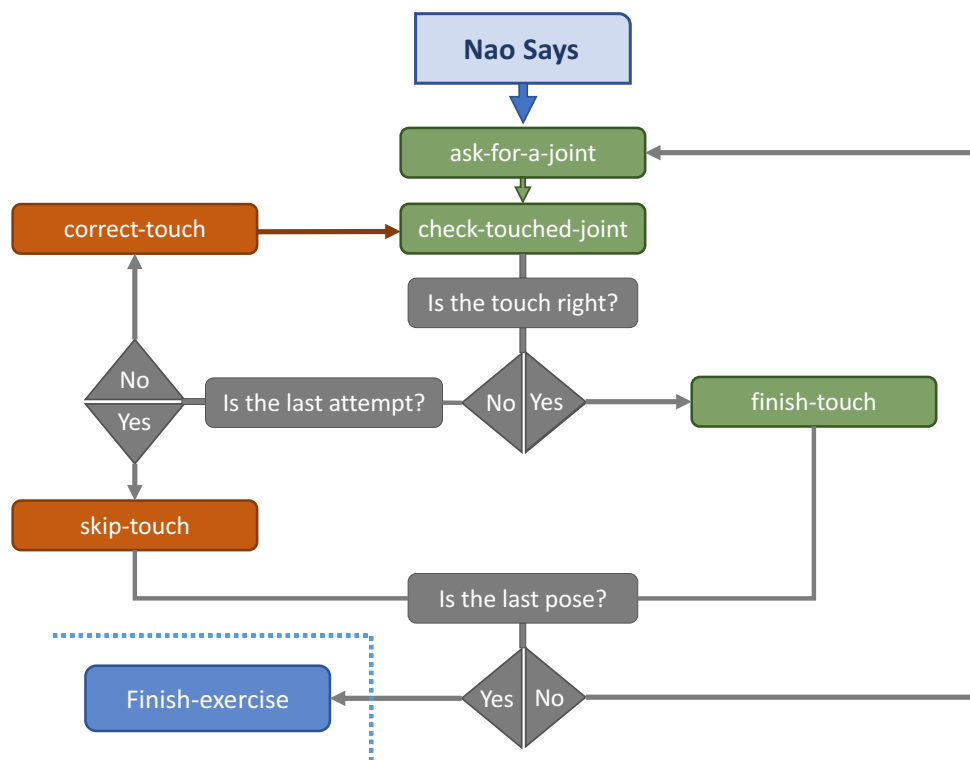


Figura 5.12: Flujo Específico del Juego *NaoSays*.

Este ejercicio proporciona un aspecto algo más cognitivo a la terapia. Esto es así porque trabaja en mayor medida las habilidades de comprensión verbal, planificación y secuenciación de los pacientes, al tener que procesar las órdenes y no solo imitar unas posturas. Así, para poder realizar correctamente este tipo de ejercicio, el niño debe tener buena conciencia y propiocepción corporal.

5.3. Sistema de Adaptación al Usuario

Otro factor de gran importancia en las terapias de rehabilitación, que ha sido significativamente mejorado de cara al campamento de terapia intensiva, es la adaptación al usuario. En estas terapias, la adaptación de la plataforma a cada uno de los pacientes puede ser entendida de dos formas: una más relacionada con el diseño de las sesiones, fundamentada en la elección de los ejercicios y poses recomendadas para cada niño, tratada en las subsecciones 5.3.2 y 5.3.3; y otra en la dificultad de la sesión, ocultada bajo la decisión del sistema robótico de marcar una pose determinada como correctamente realizada o no, descrito en el subapartado 5.3.1.

La figura 5.13 contiene un diagrama UML que muestra el modelo conceptual del diseño de las terapias desarrollado para este sistema de adaptación al usuario. Tal y como queda plasmada, este modelo permite que dicho diseño sea adaptable a las necesidades y características de los pacientes con tan solo cambiar los atributos o parámetros observables en la figura.

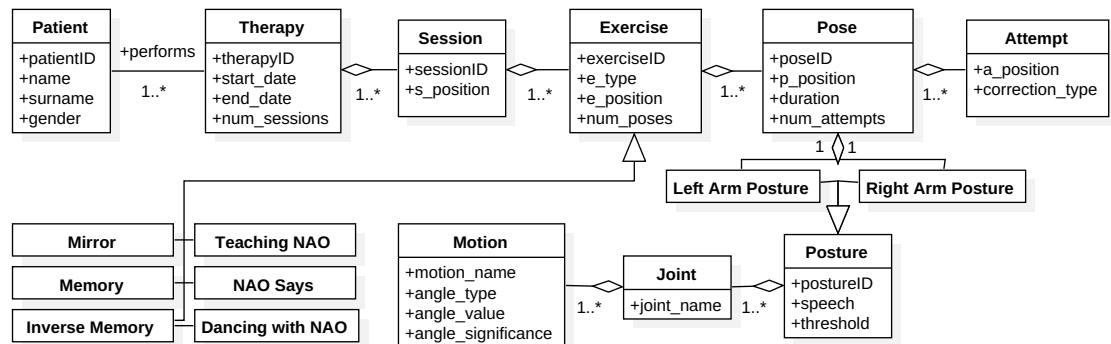


Figura 5.13: Modelo de Adaptación al Usuario.

En las siguientes secciones se tratarán distintos aspectos de la adaptación de usuario mostrados en el diagrama anterior. Así, se entrará en detalle de las principales partes que componen el modelo de adaptación, divididos en base al componente o módulo en el que se puede encontrar su uso. Es decir, aunque, como se verá más tarde, todos estos datos personales se encuentran recogidos en la Base del Conocimiento (*Knowledge Base*) del sistema NaoTherapist. Su tratamiento para adaptar los diferentes parámetros de una sesión de terapia al propio paciente se realiza en distintos módulos: *Vision*, *Executive* y *Therapy Designer* respectivamente.

5.3.1. Sistema de Umbrales Personales

El primer mecanismo de adaptación al usuario desarrollado es el sistema de umbrales personales. Este nuevo sistema de umbrales es empleado durante las comparaciones de las posturas, entendiendo una postura como uno de los lados que conforman una pose, ya sea el izquierdo o el derecho; como puede verse en la figura 5.13 una pose se compone de postura izquierda y postura derecha. Con este sistema de umbrales se pretende simular la dificultad de las sesiones de terapia, teniendo que ser adaptable a cada paciente según su grado de discapacidad físico-motora o cognitiva. Por tanto, estos umbrales indican cómo de permisivo es el robot a la hora de clasificar una postura hecha por el usuario como buena.

En la versión inicial de la arquitectura NaoTherapist, la comparación de posturas se realizaba en base a un único umbral, con un valor prefijado común para todos y cada uno de los usuarios e invariable fuera cual fuera la pose o posturas a realizar. No obstante, este valor sí que era dinámico a lo largo de una sesión, variando en función de los fallos y aciertos que fuera cometiendo el usuario durante la realización de los ejercicios de *Mirror*, aumentando en caso de fallo para disminuir la frustración del paciente, y disminuyendo en menor medida en caso de hacerlo bien para aumentar progresivamente la dificultad.

Rápidamente se detectó un gran margen de mejora en este aspecto, puesto que cada niño tendrá unas limitaciones físicas más o menos severa, por lo que la dificultad dada a cada uno no debería ser la misma desde el principio de la sesión. Además, el tipo de afección sufrida o el lado afectado también podrá ser distinto, costándoles un mayor esfuerzo realizar correctamente unas posturas que otras.

Así pues, en busca de dicha adaptación al grado y tipo de afección presentada por los pacientes, se propuso, diseñó e implementó el sistema de umbrales personales que será detallado a continuación. Este nuevo sistema trabaja de una forma mucho más dinámica, habiendo dos umbrales por pose, uno para la postura derecha y otro para la izquierda, y siendo además estos umbrales dependientes del paciente. De esta manera, en la Base del Conocimiento se crean una serie de ficheros XML, uno por cada paciente que vaya a participar en la terapia con el robot, en los que se almacenarán los valores de los umbrales junto a su correspondiente postura en la que se aplica, distinguiendo también lado izquierdo y lado derecho. Gracias a esta estructura de datos, con umbrales definidos tanto por postura como por paciente, y a su almacenaje persistente, esta información se recupera durante la ejecución de una sesión de terapia en todas las comparaciones de posturas, obteniendo el valor que corresponda a paciente y postura a comparar.

Al mismo tiempo, estos umbrales también varían dinámicamente a medida que avanza la sesión de terapia, teniendo un impacto sobre las siguientes sesiones e incluso ejercicios, si en ellos se realizan las mismas posturas. En caso de que un paciente no realice correctamente una postura, porque la distancia calculada entre la postura deseada y la puesta por el usuario es mayor que el umbral obtenido del fichero XML personal del mismo, el correspondiente umbral se incrementa en una pequeña proporción y se vuelve a almacenar en el fichero antes del siguiente intento, si es que lo hay, o la siguiente vez que se lleva a cabo esa misma postura. Contrapuesto a esto, si la postura es realizada correctamente en el primer intento, el umbral se reduce, aumentando la dificultad de la postura para la siguiente ocasión. El valor que pueden tomar estos umbrales también tienen un máximo y un mínimo, para controlar la dificultad dentro de un rango determinado.

Tras cada intento, los umbrales son siempre guardados en el correspondiente fichero del paciente, teniendo así datos válidos y consistentes en todo momento, los cuales pueden ser perfectamente usados para la siguiente sesión. Con esto, tras finalizar una sesión o completar la terapia, puede verse la evolución del paciente con tan solo observar como han variado estos umbrales, ya sea divididos por posturas, por lado o incluso una visión general con la media de todas las posturas (ver figura 5.14).

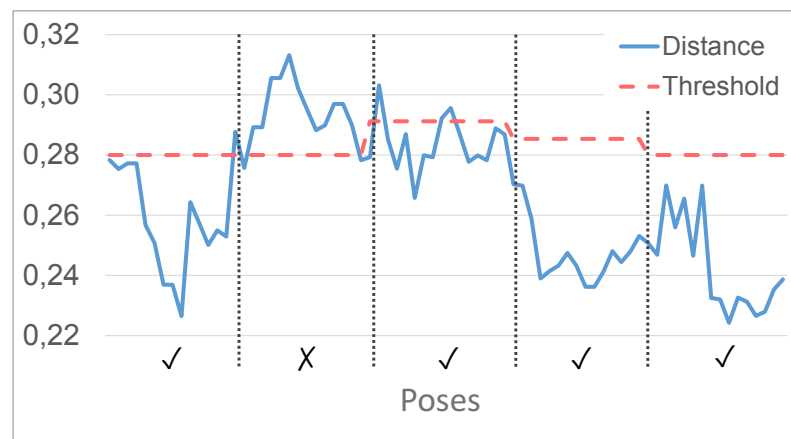


Figura 5.14: Evolución de los Umbrales de un Paciente.

Por último, con el fin de alcanzar esta adaptación de la dificultad desde el mismo inicio de la terapia, en primer lugar debe realizarse un ejercicio de calibración. En este ejercicio, el robot no corrige las poses, sino que solamente observa cómo el niño imita todas las posturas, bajo la supervisión de un terapeuta que le va dando indicaciones.

Mediante esta observación, se incrementan o reducen los umbrales de cada postura (iniciados aquí a un valor fijo) de acuerdo a cómo de bien las haga el usuario, siendo estas variaciones sufridas mucho más agresivas que en el transcurso de una sesión normal. Luego, estos umbrales van siendo guardados en el correspondiente fichero del paciente mencionado anteriormente. Con la ayuda de esta calibración inicial, el sistema se adapta desde el primer momento a los rangos articulares de cada niño, favoreciendo la individualización y ajuste del tratamiento.

5.3.2. Adaptación de las Posturas

En el anterior apartado se exponía cómo el sistema realiza la adaptación de la dificultad de los ejercicios a las características del paciente, almacenando información personal en ficheros XML separados para cada paciente. Otro mecanismo de adaptación al usuario, a medio camino entre el visto ajuste de la dificultad y la personalización de las sesiones que se verá más adelante, es la adaptación de las posturas. El fin de este mecanismo está en ajustar las diferentes posturas existentes en el catálogo a las necesidades y limitaciones del paciente, tanto en forma de la complejidad de la sesión, como en las poses adecuadas a realizar durante las sesiones.

Inicialmente, la arquitectura NaoTherapist incluía un solo catálogo de posturas disponibles, las cuales eran comunes para todos los usuarios del sistema. De este mismo catálogo se obtenían las posturas que el robot debía ejecutar y luego contrastar respecto a la llevada a cabo por el paciente, independientemente de cuál fuera éste. Esto provocaba que, en ocasiones, se presentara al niño una determinada postura a la que no sería capaz ni de acercarse dadas sus limitaciones físicas. Por tanto, esto también formaba parte de las posibles mejoras a desarrollar.

En la anterior subsección (5.3.1) se detallaba cómo existía un fichero de información por paciente, en el que cada postura tiene asignado un identificador y un umbral con el que comprobar la realización de la misma de manera adaptada. Para desarrollar la adaptación de las posturas se toma esta idea, y se combina con lo que había anteriormente. De este modo, en cada fichero personal de cada paciente, junto a la correspondiente postura, ahora también se incluye toda la información referente al modelo antropométrico desarrollado que definen una postura, tal y como se muestra en la figura 5.15.

Así, los terapeutas pueden disponer de posturas con ángulos ajustadas a las limitaciones de cada paciente, e incluir únicamente aquellas posturas que son recomendadas para el mismo dadas sus características clínicas, excluyendo las que no pueda alcanzar. Entonces, durante la configuración de las sesiones de rehabilitación solo se podrán escoger aquellas posturas incluidas en el catálogo personal del paciente y, al mismo tiempo, estas posturas puede ser adaptadas si, por ejemplo, el terapeuta quiere que el paciente realice las posturas con las palmas

```
<patient id="patient0">
  <name>Kid</name>
  <surname>Wilson</surname>
  <dob>2006/01/01</dob>
  <age>11</age>
  <affection>cerebral palsy</affection>
  <affected_side>left</affected_side>
  <current_session>1</current_session>

  <postures>

    <posture id="10" name="Default_Pose" threshold="0.1288">
      <ShoulderLeft>
        <FlexionExtension>
          <AngleType>FlexionExtensionShoulderLeft</AngleType>
          <AngleValue>-9.63</AngleValue>
          <Significance>0.00</Significance>
        </FlexionExtension>
        <AbductionAdduction>
          <AngleType>AbductionAdductionShoulderLeft</AngleType>
          <AngleValue>8.88</AngleValue>
          <Significance>0.00</Significance>
        </AbductionAdduction>
        <Rotation>
          <AngleType>LateralFlexionExtensionShoulderLeft</AngleType>
          <AngleValue>-12.14</AngleValue>
          <Significance>0.00</Significance>
        </Rotation>
      </ShoulderLeft>
      ... (Other Joints)
      <Description>sh.flex 0, sh. abduct 0 (rest pose)</Description>
      <SpeechUnilateral> </SpeechUnilateral>
      <SpeechBilateral> </SpeechBilateral>
      <SpeechCombinationFirst> </SpeechCombinationFirst>
      <SpeechCombinationSecond> </SpeechCombinationSecond>
      <VisionCheck>True</VisionCheck>
    </posture>
    ... (Other Postures)

  </postures>
</patient>
```

Figura 5.15: Contenido de un Fichero XML de Paciente.

Por otro lado, más relacionado con la computación de la similitud entre posturas, se encuentra el atributo de significancia, relacionado a cada articulación del modelo antropométrico. Este valor puede ser modificado por los terapeutas que supervisan las sesiones de terapia y que conocen a fondo el estado del paciente. Colocando un menor valor de significancia para un movimiento articular en concreto, la distancia calculada entre el ángulo fijado en la postura del robot y el ángulo de la postura del niño será menor. Con ello, la dificultad de una postura podrá ser reducida únicamente para un movimiento articular específico, para aquellos usuarios que tienen serios problemas de movilidad en una articulación y un movimiento muy concretos.

5.3.3. Personalización de las Sesiones

En esta última sección sobre la descripción de las mejoras propuestas, su diseño e implementación, se trata la configurabilidad y personalización de las sesiones de rehabilitación. Esto consiste en una descripción de todos los parámetros que se han hecho configurables a la hora de diseñar una sesión de terapia, para un paciente concreto, por parte de los terapeutas.

En sus inicios, la plataforma NaoTherapist solo permitía a los terapeutas configurar una serie de ejercicios, decidiendo sobre las posturas que compondrían cada pose, el número de poses a realizar en el ejercicio, y el orden en el que se realizarían éstas. Se configuraban diversos ejercicios de diferente longitud y complejidad, y luego un diseñador automático de terapias seleccionaba estos ejercicios para diseñar varias sesiones a lo largo de una terapia. Sin embargo, los terapeutas demandaban tener un mayor control sobre la terapia, por lo que este generador de terapias automático se desechó, pudiendo también decidir los terapeutas los ejercicios incluidos en cada sesión.

Como puede verse, todo este aspecto de configurabilidad de las sesiones está muy relacionada con la planificación de las sesiones. Por lo tanto, todo el trabajo realizado en este sentido reside en el desarrollo de los predicados y acciones que componen el dominio de planificación detallado en la sección 5.2. Por ello, aquí solo se expondrán los parámetros incluidos para proporcionar una mayor configurabilidad de las sesiones, de acuerdo a las necesidades específicas de los pacientes, los cuales pueden verse representados en el diagrama de la figura 5.13 del modelo de adaptación al usuario.

A la hora de diseñar una terapia para un paciente determinado, el terapeuta primero debe registrar sus datos personales y la duración de la terapia. El siguiente paso es configurar las sesiones que compondrán dicha terapia de rehabilitación. A cada sesión se le deben asignar los ejercicios a completar, pudiendo ser ahora éstos de cuatro tipos distintos en una misma sesión (*Mirror*, *Memory*, *Inverse Memory* y *Nao Says*), a la vez que se da un orden de ejecución a cada ejercicio seleccionado. Luego, para cada ejercicio, debe también establecer las poses que contendrán los ejercicios y su orden, al igual que los ejercicios. Como ya se ha mencionado, cada pose se forma con una postura del lado derecho y una del lado izquierdo, seleccionando aquellas que se consideren apropiadas del catálogo de posturas disponibles del paciente concreto para el que se diseñe la sesión. Todas estas son las acciones que siempre tendrá que hacer un terapeuta, ya que no se establecen ejercicios ni poses por defecto.

No obstante, existe otra serie de parámetros que extienden la configurabilidad a un mayor nivel, los cuales no es obligatorio indicar porque tienen prefijados valores por defecto considerados como “normales”. El trabajo realizado en el nuevo dominio de planificación permite ahora definir nuevas variables en una sesión para cada pose:

- ***num_attempts***: parámetro que indica el número de intentos que el paciente tendrá para realizar correctamente una determinada pose. En la arquitectura previa, el número de intentos se encontraba fijo en 2 intentos.
- ***Attempt - correction_type and a_position***: indicando la posición de cada intento, ahora también se permite definir el tipo de corrección que realiza el robot tras cada intento, pudiendo variar entre correcciones visuales (tipo espejo o recordatorios de la pose) y auditivas (con pistas habladas).
- ***duration***: recoge el tiempo que el paciente debe mantener una pose correctamente para validar la misma, cuyo valor estaba prefijado anteriormente en 2 segundos.
- ***waiting_time***: tiempo de margen que se le da al paciente para empezar a poner una pose similar a la solicitada, anteriormente fijado en 3 segundos.

Gracias a la configurabilidad de todos estos parámetros u opciones de diseño de las sesiones, los terapeutas podrán adaptar las mismas a los pacientes, en función de sus necesidades clínicas. Además, pudiendo modificar el tipo de ejercicios a llevar a cabo, el paciente puede realizar sesiones que pongan un mayor énfasis en la parte cognitiva o sea un trabajo más físico, dependiendo de su afección. Por otra parte, cambiando las posturas elegidas para las poses de los ejercicios, los niños pueden ejercitar más unas articulaciones que otras.

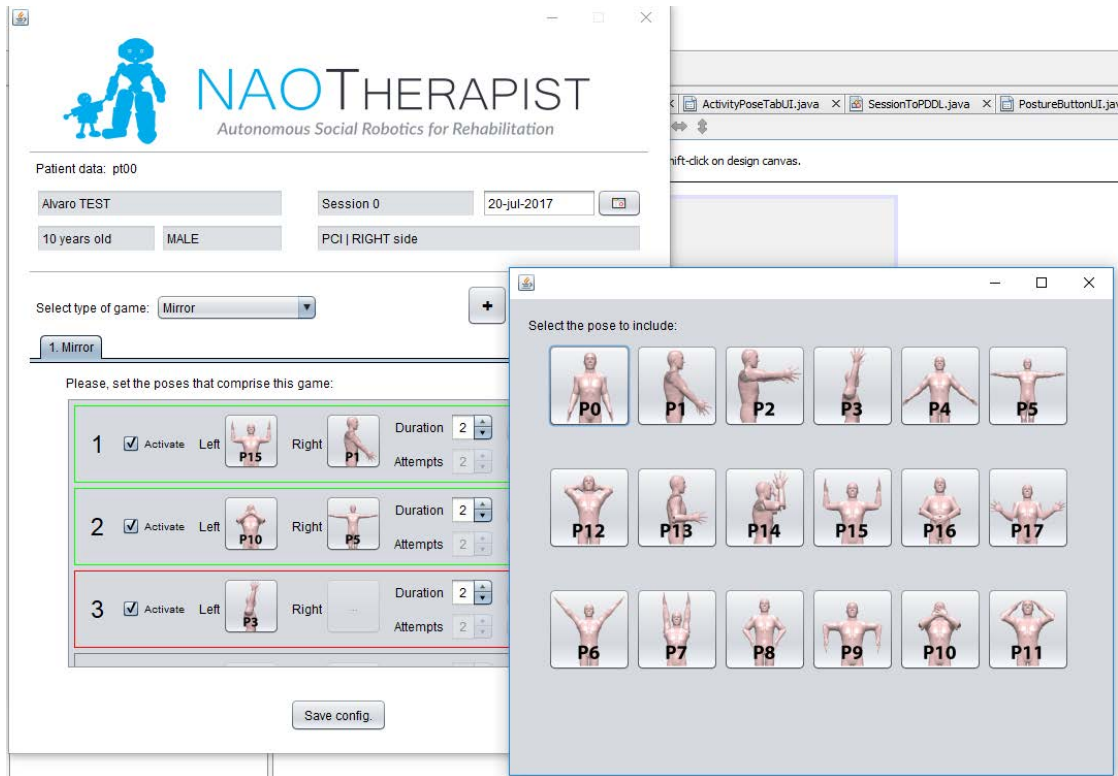


Figura 5.16: Pantalla de Configuración de Sesiones (en fase beta).

Capítulo 6

Experimentación y Pruebas

El objetivo principal de esta fase de experimentación es determinar los beneficios y debilidades de los modelos planteados en este trabajo y, por consiguiente de la plataforma desarrollada en su conjunto, de cara a su uso en pacientes reales. Cabe indicar que todas las pruebas y experimentos que serán presentados, han sido realizados en un ordenador con las siguientes características: Intel® Core™ i3-3220 CPU @ 3.30GHz \times 4 núcleos, 8GB de RAM y Ubuntu 13.04 64bits.

De esta manera, en primer lugar, se evaluará todo el proceso de planificación de las sesiones de terapia (6.1), intentando verificar que la inclusión de los nuevos juegos o actividades diseñados en el mismo dominio no aumenta en exceso el tiempo de planificación, lo que podría ser perjudicial para la interacción entre robot y paciente. Con esto se comprobaría el correcto funcionamiento del proceso de planificación, pero la replanificación tiene lugar en tiempo de planificación, por lo que también se han probado la correcta ejecución de los casos de uso completos. Estas pruebas de ejecución primero se realizaron en laboratorio, a medida que se iba progresando en el desarrollo de la herramienta. Tras finalizar todo el proceso de desarrollo, la plataforma NaoTherapist también fue evaluada con pacientes reales, en un campamento de terapia intensiva celebrado en Madrid, cuya organización y resultados se detallarán más adelante, en la sección 6.3.

6.1. Planificación de Sesiones de Terapia

Con el fin de evaluar el desempeño del nuevo dominio de planificación implementado frente al incluido antiguamente en la arquitectura NaoTherapist, se han diseñado dos pruebas experimentales. La primera está orientada a comparar el rendimiento de la planificación en actividades o juegos aislados; y la segunda está configurada para ser más similar a una sesión de terapia real, con un problema mixto que incluya diversos tipos de actividades.

En la ejecución del componente de planificación de las arquitecturas, tanto la nueva como la antigua, se ha usado el planificador Metric-FF [Hoffmann et al., 2003] para generar los planes de acciones del robot, en un ordenador con las características indicadas al inicio de este capítulo (Intel Core i3, 3.30GHz x 4, and 8 GB of RAM).

6.1.1. Rendimiento Dominio Antiguo vs Nuevo

Para la primera prueba, se han creado dos configuraciones tipo de un problema de planificación. Uno basado en la actividad del *Mirror*, que consiste en 10 ejercicios de *Mirror*, compuestos por un total de 5 poses distintas cada uno. Luego, otro problema más relacionado con el juego del *Memory*, formado por un solo ejercicio del *Memory* compuesto por 10 poses o rondas a completar.

La tabla 6.1 muestra los resultados de la experimentación realizada para las dos configuraciones mencionadas. En ella, se comparan los tiempos de planificación y el número de acciones de ambas implementaciones, el dominio de planificación antiguo y la nueva versión integradora planteada en este trabajo. Tal y como puede observarse, existen diferencias considerables en el tiempo de planificación entre la versión antigua de los dominios del *Mirror* y del *Memory*, y el nuevo dominio propuesto.

Esta nueva versión, como ya se ha mencionado en el capítulo 5 referente al diseño e implementación, integra estas dos actividades en un mismo dominio, además de añadir los nuevos tipos de ejercicios. Dos de estas cuatro nuevas actividades son las tratadas en este documento, ya detalladas, y las dos restantes (*Teaching Nao* y *Dancing with Nao*) han sido elaboradas por otra alumna del Grado de Informática, Irene Díaz Portales.

		Hoja1			
		Old Domain	New Domain	Old Domain	New Domain
Type of Activity		Mirror		Simon / Memory	
Domain Description	Num. Types	10	22	9	22
	Num. Predicates	26	44	15	44
	Num. Funtions	6	14	12	14
	Num. Actions	22	51	15	51
	Shuffling	-		Yes	No
Problem Description	Num. Exercises	10		1	
	Num. Poses/Ex.	5		10 (turns)	
Generated Plan	Total Time (s)	0.02	0.19	0.77	0.01
	Total num. Actions	146	207	281	197

Tabla 6.1: Resultados del Dominio Antiguo vs Nuevo

El problema del juego del *Mirror* configurado puede considerarse como el peor caso posible, ya que normalmente las sesiones de terapia no suelen incluir más de 5 ejercicios, por lo que se debe tener en cuenta que en una sesión “real” las diferencias serían menores. Se puede observar un incremento del tiempo total de generación del plan, aumentando desde los 0,02 segundos hasta los 0,19 segundos, con 146 y 207 acciones planificadas respectivamente.

No obstante, este incremento del tiempo de planificación puede ser perfectamente asumido por la arquitectura NaoTherapist, puesto que 0,19 segundos no resultan ser suficientes como para influir negativamente en la interacción entre el robot y el paciente, al seguir siendo la respuesta del robot a cualquier evento casi inmediata. Además, el aumento en tiempo de planificación se ve compensado por la utilidad de este nuevo dominio, ya que permite integrar en una misma sesión diferentes tipos de ejercicios, algo que anteriormente no era posible.

Respecto al tiempo de planificación empleado para generar un plan válido de una sesión de *Memory* (anteriormente llamado *Simon*), éste se reduce significativamente con la nueva implementación realizada, reduciéndose desde los 0,77 segundos hasta los 0,01 segundos. Esta disminución del tiempo de planificación se consigue a pesar de la integración de todos los tipos de ejercicios en la nueva versión del dominio, sin tener un dominio específico para el *Memory*.

La razón de esta reducción del tiempo reside en la supresión de la técnica de barajado de las poses usada en la versión antigua para aleatorizar el orden de las poses en el juego. Esta funcionalidad dejó de tener sentido, ya que los terapeutas demandaban poder escoger el propio orden de las poses, buscando fundamentalmente un mayor control sobre la dificultad del ejercicio.

6.1.2. Rendimiento de una Sesión Mixta

Para la segunda parte de esta experimentación de la planificación de sesiones de rehabilitación, se optó por probar la búsqueda y ejecución de un plan de un problema que pudiera ser perfectamente usado en cualquier sesión de terapia, con el fin de servir como demostración de las capacidades de NaoTherapist. De esta forma, el problema contiene todos los tipos de actividades que la plataforma permite llevar a cabo, un total de 6 juegos distintos, con 2 poses a realizar en cada uno de ellos. Dos de estas actividades son el *Mirror* y el *Memory*, cuya mejora ha sido tratada en este trabajo; otros dos son los juegos *Inverse Memory* y *Nao Says*, de nueva creación y cuyo diseño e implementación también se ha planteado aquí; y las dos restantes (*Teaching Nao* y *Dancing with Nao*) han sido elaboradas por otra alumna del Grado de Informática, Irene Díaz Portales, teniendo como base el trabajo detallado en este documento.

Los resultados obtenidos en este experimento son mostrados en la Tabla 6.2. Puede observarse como el plan resultante del problema mencionado tse genera en un tiempo de 0,03 segundos, sumando un total de 91 acciones. El número de acciones total viene desglosado por tipo de actividad o juego, pudiendo ver la importancia de cada uno en número de acciones respecto a toda la sesión de rehabilitación en su conjunto. En esta tabla, también se incluye, a modo de ejemplo, parte del plan generado por el planificador a partir del problema dado.

Hoja1		
		Mix. problem
Activities	Num. Exercises	6
	Num. Poses/Act.	2
Problem Description	Total Time (s)	0,03
	Total Num. Actions	91
Generated plan	General Flow actions	7
	Mirror actions	11
	Dancing actions	11
	Memory actions	18
	Inv. Memory actions	18
	Teaching actions	15
	NAO Says actions	11
Generated Plan Example		
...		
62: INTRODUCE-EXERCISE TEST-TEACHME NAO PT00 SES1 TEACH-ME		
63: START-EXERCISE TEST-TEACHME NAO PT00 STAND-UP TEACH-ME		
64: ASK-FOR-A-NEW-POSE TEST-TEACHME P_ID8 NAO PT00 STAND-UP		
65: LEARN-POSE P_ID8 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN T2 ...		
66: EXECUTE-LEARNT-POSE P_ID8 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...		
67: SEQUENCE-CHECK-POSE P_ID8 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...		
68: FINISH-LEARNT-POSE P_ID8 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...		
69: ASK-FOR-A-NEW-POSE TEST-TEACHME P_ID9 NAO PT00 STAND-UP		
70: LEARN-POSE P_ID9 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...		
71: EXECUTE-LEARNT-POSE P_ID9 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...		
72: SEQUENCE-CHECK-POSE P_ID9 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...		
73: FINISH-LEARNT-POSE P_ID9 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...		
74: FINISH-INDIVIDUAL-EXERCISE TEST-TEACHME NAO PT00 TEACH-ME		
75: CALC-PERCENTAGE-ATTEMPTS-FAILED TEST-TEACHME NAO PT00 ...		
76: GIVE-PATIENT-HIGH-REWARD TEST-TEACHME NAO PT00		
...		

Tabla 6.2: Resultados del Problema Mixto.

Generalmente, pueden observarse incrementos de los tiempos de planificación, comparando lo implementado con la versión previa de la arquitectura. Sin embargo, este aumento del tiempo no llega a afectar a la interacción entre paciente y robot durante la realización de la sesión de rehabilitación, un aspecto de gran importancia dentro de la plataforma, por lo que no resulta ser un efecto grave.

Este incremento del tiempo de planificación se debe a la conseguida integración en el mismo dominio de todos los tipos de actividades, lo que implica un mayor número de tipos, predicados, funciones y acciones con los que el planificador debe generar un plan correcto. Así, se obtienen beneficios en cuanto a la integración de ejercicios en una misma sesión, dando ahora la oportunidad de que los resultados de un ejercicio tengan luego un impacto sobre los que se realizarán a continuación. Por ejemplo, una pose aprendida por el robot en un ejercicio de *Teaching Nao*, luego puede ser usada en la misma sesión en un ejercicio de *Mirror*, sin necesidad de detener la misma.

6.2. Pruebas de Ejecución en Laboratorio

Como ya se ha visto, los experimentos anteriores están todos directamente relacionados con el tiempo de planificación necesario para generar los planes de acciones que componen distintas sesiones de rehabilitación con diferentes tipos de ejercicios. No obstante, solo con esto no se termina de comprobar el correcto funcionamiento de la planificación automática de sesiones de terapia. Esta planificación conlleva luego la consiguiente ejecución del plan generado, llevando a cabo cada una de las acciones que conforman el plan resultante, por lo que debe verificarse la realización de estas acciones de bajo nivel. Además, durante esta ejecución del plan, pueden tener lugar uno o varios procesos de replanificación, siempre y cuando el estado del mundo sea distinto al esperado, lo cual debe ser también probado.

En definitiva, todo esto se resume en unas pruebas de ejecución necesarias para verificar que todos los componentes desarrollados funcionan adecuadamente, de forma que se pueda hacer uso de la herramienta para llevar a cabo sesiones de rehabilitación reales con el robot. Así, se han realizado una serie de pruebas o tests que demuestran que la herramienta es capaz de seguir todos y cada uno de los casos de uso descritos en el capítulo 4, cumpliendo entonces con todos los requisitos definidos.

En este sentido, tras terminar cada uno de los componentes que se iban desarrollando, se realizaban exhaustivas pruebas de funcionamiento, intentando cubrir todos los posibles flujos de ejecución. A continuación, se presentan las principales pruebas realizadas:

- **T01.** Se comprueba que puede iniciarse únicamente el componente de *Vision*, presentando la correspondiente interfaz desarrollada (Requisitos R-V07, R-V08 y R-V11).

- **T02.** Se comprueba que el sistema detecta a un usuario/paciente, crea su modelo antropométrico y presenta los datos de éste y su representación en la interfaz de *Vision* (R-V01, R-V02, R-V06, R-V09).
- **T03.** Se comprueba que se guarda correctamente en la Base del Conocimiento una nueva pose grabada a través de la interfaz de *Vision* (R-V05, R-V12, R-U01).
- **T04.** Se comprueba que puede configurarse una sesión de rehabilitación con el robot, generándose correctamente el problema PDDL a partir de las opciones escogidas (R-U02).
- **T05.** Se comprueba que puede iniciarse una sesión de rehabilitación configurada previamente, cargándose el problema PDDL generado, pasándolo luego al planificador para obtener un plan de acciones que luego ejecutar para llevar a cabo la sesión (R-V03, R-V04, R-P01, R-P02, R-P03, R-P09).

T05-1. Correcta ejecución de un ejercicio de *Mirror* (R-P05).

T05-2. Correcta ejecución de un ejercicio de *Memory* (R-P06).

T05-3. Correcta ejecución de un ejercicio de *Inverse Memory* (R-P07).

T05-4. Correcta ejecución de un ejercicio de *Nao Says* (R-P08).

T05-5. Correcta ejecución de una sesión mixta típica (R-P04).

En el caso de las pruebas referentes a la ejecución de ejercicios y sesiones de terapia (T05), se ha seguido un procedimiento determinado. Primero, se ejecutaba la sesión configurada en un entorno virtual proporcionado por Choregraphe, en el que existe un robot NAO virtual que simula a su homólogo físico ¹. Con esto, se procuraba evitar posibles daños en el robot NAO real, ya que podían tener lugar movimientos demasiado bruscos o extraños para el robot. Entonces, si el NAO virtual realizaba correctamente la sesión, a continuación se probaba la misma sesión con el robot real ², asegurándose la seguridad de éste.

¹Vídeo de la ejecución virtual de una sesión mixta de terapia: <https://goo.gl/Zte7mQ>

²Vídeos de sesiones de prueba: <https://www.youtube.com/user/NAOTherapist>

6.3. Evaluación Clínica con Pacientes Reales

Una de las principales motivaciones para la realización de este trabajo, mencionada en el primer capítulo de este documento, era la participación de la plataforma en un Campamento de Terapia Intensiva. La participación de NaoTherapist en dicho campamento finalmente se hizo efectiva, proporcionando una oportunidad idónea para evaluar el uso de la herramienta en un entorno clínico real, con pacientes y terapeutas reales. De esta forma, se ha podido observar su buen funcionamiento, a la vez que se han podido detectar sus puntos fuertes y sus carencias.

En este campamento de rehabilitación se siguió en todo momento la metodología HABIT (Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy), ya detallada en la sección 1.3. La duración del mismo fueron 21 días, empezando el día 13 de julio, hasta el 2 de agosto, inclusive. Las jornadas de rehabilitación eran de 5 horas, y tenían lugar todos los días, de lunes a sábado. Al campamento acudieron un total de 10 niños afectados por parálisis cerebral, con distintos grados de afección y edades de entre 5 y 13 años. Cada paciente tenía asignado un terapeuta personal que le acompañaba en los ejercicios de terapia, la mayoría de los cuales se ocultaban bajo un ambiente de juego. Uno de estos juegos de terapia consistía en una sesión de rehabilitación con la plataforma NaoTherapist, de una duración aproximada de 20 minutos, la cual se ha llevado a cabo una vez al día durante 11 días (10 sesiones de ejercicios + 1 de calibración).



Tabla 6.3: Paciente Ejercitándose con NaoTherapist

El objetivo del campamento era conseguir una mejora considerable en la movilidad articular de los pacientes. Al mismo tiempo, se intentó evaluar el efecto del uso de la metodología HABIT, observando las diferencias entre un grupo experimental que seguía dicha metodología y un grupo control que seguía un proceso de terapia intensiva típico. Por ello, aquí también se intenta hacer una aportación a esta evaluación, mostrando un análisis de los datos adquiridos por la plataforma durante las sesiones con NaoTherapist.

En la siguiente tabla (6.4) resaltan dos elementos a explicar. Primero, hubo un paciente (Víctor) que abandonó el campamento prematuramente por motivos personales, por lo que solo completó la mitad de las sesiones. En segundo lugar, uno de los pacientes era de nacionalidad italiana y no hablaba español, necesitando un terapeuta italiano que le hiciese de traductor. Esto último mostró claramente una limitación de la plataforma, la cual está desarrollada para llevar a cabo sesiones únicamente en español, por lo que se precisaría de un sistema traductor con el que el robot podría hablar en varios idiomas, al igual que la información o interfaces a presentar.

ID	Nombre	Edad	Nacionalidad	Lado Afectado	Grupo	Sesiones Completadas
pt01	Diego	8	Español	Derecho	Control	8
pt02	Lucas	12	Español	Derecho	Control	8
pt03	Jorge	9	Español	Izquierdo	Control	8
pt04	Santiago	7	Español	Izquierdo	Control	8
pt05	Mario	6	Italiano	Izquierdo	Control	8
pt06	Marta	9	Español	Izquierdo	Experimental	8
pt07	Andrea	11	Español	Izquierdo	Experimental	8
pt08	Hector	6	Español	Izquierdo	Experimental	8
pt09	Miguel	8	Español	Izquierdo	Experimental	8
pt10	Víctor	10	Español	Derecho	Experimental	4

Tabla 6.4: Pacientes del Campamento de Terapia Intensiva

Por otro lado, antes de iniciar el análisis de la progresión de los pacientes, cabe recordar cuál es la información adquirida por la plataforma en el transcurso de las sesiones de rehabilitación y cómo ésta es tratada. La herramienta NaoTherapist capta en todo momento al usuario más cercano situado frente al sensor Kinect, generando también su modelo antropométrico de ángulos articulares, desde que se inicia. Entonces, cuando el robot indica una pose a realizar, se compara la pose objetivo con la puesta por el paciente, obteniéndose una distancia entre ambas. Luego, esta distancia se compara con un umbral correspondiente a la pose y al propio paciente, que va ajustándose en función de la correctitud de la pose, aumentando si está mal o reduciéndose en caso contrario.

Por tanto, la información recogida para observar la progresión del paciente se basa en este umbral cambiante, que se reducirá a lo largo de la terapia si el paciente realmente muestra una mejora en la movilidad de la zona afectada. Así pues, en todas las sesiones de rehabilitación desarrolladas se han recogido las distancias entre las poses, los umbrales resultantes tras la realización de cada una de estas, y una etiqueta que indica si la correspondiente pose se realizó correctamente o no. Además, la información de los umbrales luego fue organizada por paciente, sesión y pose, pudiendo observar la mejora presentada por cada paciente en cada pose.

En el capítulo Anexo III se incluyen todas y cada una de las tablas de los pacientes, en las que se recogen los umbrales de las poses calculados a lo largo de la terapia con el robot. Estos datos se organizan divididos por pose, de forma que pueda observarse la progresión alcanzada en cada una de ellas, y por lado, pudiendo fijarse únicamente en el lado afecto del paciente. Así, a continuación se presenta solo una tabla resumen de los resultados de la terapia para cada uno de los pacientes.

Paciente	# Intentos	# Fallos	% Fallos	# Poses Mejoradas	# Poses Empeoradas	Progresión Media	Progresión Lado Afecto
pt01	552	120	21,74%	26	3	13,90%	12,45%
pt02	496	115	23,19%	20	9	8,95%	2,78%
pt03	575	118	20,52%	26	4	18,25%	18,44%
pt04	629	214	34,02%	7	24	-24,58%	-21,93%
pt05	527	119	22,58%	28	6	12,25%	10,10%
pt06	547	134	24,50%	21	9	10,54%	9,29%
pt07	447	92	20,58%	33	1	17,77%	19,46%
pt08	270	108	40,00%	19	12	6,44%	7,68%
pt09	551	155	28,16%	17	14	3,59%	4,56%
pt10	164	72	43,90%	9	12	-4,69%	-3,12%

Tabla 6.5: Resultados de la Evaluación en el Campamento

Observando los resultados de la evaluación de la plataforma, presentados en la tabla 6.5, puede comprobarse cómo existe una mejora generalizada de los participantes. Los datos presentados cobran sentido por sí solos, pudiendo ver cómo el porcentaje de intentos fallidos es inversamente proporcional a la cuantía de la mejora representada mediante los cambios en umbrales de aceptación. Por supuesto, cada uno de los resultados obtenidos para cada niño no son del todo comparables entre sí. Esto se debe a que cada paciente realizaba sesiones adaptadas a sus necesidades, diseñados también por terapeutas distintos. Entonces, queda claro que la progresión que presente el paciente es dependiente, de forma externa a la plataforma, del terapeuta y de las características únicas de cada niño.

Por lo general, los pacientes demostraban prestar una atención considerable al robot, siendo una experiencia muy atractiva y original, diferenciándose considerablemente de todas las terapias de rehabilitación realizadas anteriormente. Todo ello conseguía que el compromiso de los pacientes con los ejercicios y poses que debían realizar se elevará, lo que influía directamente en su proceso de rehabilitación, mejorando notablemente su movilidad. Pudiendo presenciar algunas de las sesiones de terapia con NaoTherapist, se puede decir que aquellos pacientes que han demostrado tener una mayor mejora son también los mismos que se mostraban más entusiasmados con la presencia del robot.

Además, en todos los casos, una funcionalidad que tuvo gran impacto fue el sistema de recompensas. Los pacientes rápidamente se dieron cuenta que cuanto más atención prestaran y mejor hicieran los ejercicios, animaciones más divertidas y llamativas haría el robot en los descansos entre ejercicios. Por tanto, estas animaciones supusieron una gran motivación añadida para los niños, que tras finalizar las sesiones comentaban animadamente los bailes que les había mostrado el robot por lo bien que lo habían hecho.



Tabla 6.6: NAO con los Pacientes Andrea y Mario

Por otra parte, en la tabla 6.5 destacan dos casos por la progresión negativa que presenta el paciente. En el caso de Víctor, la causa principal es el abandono de la terapia a la mitad del campamento, lo que no le permitió poder realizar todas las sesiones con NaoTherapist. Así pues, no pueden obtenerse resultados concluyentes de la evaluación realizada con este paciente. Además, según palabras de la coordinadora del campamento (Melania García), Víctor (pt10) era el paciente que presentaba mayores dificultades motoras en ambos brazos, por lo que su rehabilitación era más complicada.

Luego, se encuentra el caso de Santiago (pt04), que presenta una progresión negativa de más del 20%. Santiago, contrapuesto a Víctor, no tenía grandes dificultades motoras (disfuncionalidades físicas), sino que su problema estaba más en el aspecto negativo, ya que padece un déficit de atención considerable. Por tanto, los peores resultados de Santiago pueden deberse a una menor atención del niño a medida que se acostumbraba al robot. Observando la tabla III.7, se observa cómo los umbrales alcanzados por Santiago en la sesión de calibración son bastante buenos, y también cómo luego estos van aumentando poco a poco a partir de la segunda sesión de terapia, por lo que parece que va mostrando una menor atención a las instrucciones. Sin embargo, estando presente en sus sesiones de rehabilitación, Santiago era el niño que más concebía al robot como un ser “casi vivo”, llegando a ver estas sesiones totalmente como un juego y no como parte de su rehabilitación. De esta forma, se inhibió tanto que simplemente quería jugar con el robot a cosas que él le proponía, en lugar de concentrarse en hacer bien los ejercicios. Este caso muestra una limitación de la plataforma NaoTherapist, la cuál debería poder también adaptarse a pacientes con mayores dificultades cognitivas, ya sea con nuevos juegos o modificando de alguna manera los ya existentes.

A lo largo de la evaluación, también se fueron recogiendo una serie de encuestas realizadas tanto a los pacientes como a sus terapeutas. En futuros estudios se analizarán éstas, centrándose en mayor medida en la interacción paciente-robot y en la utilidad y usabilidad de la plataforma. Así, podrán confirmarse las hipótesis aquí planteadas, realizando un seguimiento más individualizado de la evolución de los pacientes.

Capítulo 7

Marco Regulador

En este capítulo de Marco Regulador, se desarrollarán aquellas cuestiones relacionadas directamente con la legislación aplicable al proyecto presentado en este documento. En la primera sección, 7.1, se estudiará la legislación europea vigente sobre la protección de datos, ya que, como se explicará, en el sistema se obtienen datos de los usuarios indirectamente, por lo cual deben realizarse algunas precauciones. Tras esto, en el segundo apartado (7.2), se presentarán algunos certificados necesarios para tratar con personas, sin los cuales la plataforma NaoTherapist no podría operar, puesto que se preocupan por el cuidado de la salud de los usuarios que emplean la herramienta. En este sentido, especial mención recibe el Certificado 'IEC/EN 60601', un certificado clínico que toda herramienta tecnológica de uso sanitario necesariamente debe cumplir para poder ser comercializada. Por último, con la sección 7.3, se expone información referente a los Modelos de Utilidad y su registro formal, con el objetivo de poder realizar esta acción en el futuro y así evitar posibles problemas sobre la propiedad intelectual del proyecto.

7.1. Protección de Datos

El sistema NaoTherapist, para su correcto funcionamiento, se basa continuamente en la información antropométrica obtenida del paciente durante el transcurso de las sesiones de terapia. Esta recogida de datos se realiza en todo momento de forma indirecta y oculta a dicho usuario, por lo que no se dispone del consentimiento formal de dicho usuario.

Además, en la Base del Conocimiento, también se recogen datos personales sobre estos mismos pacientes, como el nombre o la fecha de nacimiento. Debido a todo esto, debe tenerse especial cuidado con el tratamiento de esta información personal, el cual deberá estar regido adecuadamente bajo la correspondiente legislación aplicable.

De este modo, el proyecto NaoTherapist se encuentra bajo el marco regulatorio del Reglamento Europeo 2016/679 [Consejo de la Unión Europea, 2016b] y la Directiva Europea 2016/680/EC [Consejo de la Unión Europea, 2016a]. En esta legislación se define que “Los Estados miembros garantizarán, con arreglo a las disposiciones de la presente Directiva, la protección de las libertades y de los derechos fundamentales de las personas físicas, y, en particular, del derecho a la intimidad, en lo que respecta al tratamiento de los datos personales”. Por lo tanto, esta directiva de protección de datos se aplica al tratamiento toda información personal, tanto si es de manera automatizada, como si es recogida manualmente en un formulario.

Así, es importante tener en cuenta las siguientes definiciones para acotar la aplicación de esta legislación en el proyecto:

- **Datos Personales:** toda información relacionada con una persona, que le puede identificar directa o indirectamente, en base a su identidad física, fisiológica, psíquica, económica, cultural o social.
- **Tratamiento de Información Personal:** toda operación u operaciones realizadas sobre los datos personales, ya sea automatizada o no, e incluyendo el almacenamiento de dicha información, tanto de forma temporal como persistente.

Con esto, se comprueba cómo la información recogida durante el uso normal de la plataforma NaoTherapist y su consiguiente tratamiento, se incluyen en el dominio de aplicación de esta legislación. Se recoge continuamente la información fisiológica del usuario o paciente de la herramienta, la cual luego es tratada con el fin de comparar su postura corporal con la deseada en el ejercicio. Entonces, deberá tenerse en consideración la normativa relativa a recogida de datos no proporcionados directamente por el individuo, y el tratamiento de la información personal.

Respecto a la normativa del primer tipo (recogida indirecta de datos personales), en la legislación presentada anteriormente se recoge que, en el caso de obtener datos automáticamente sin el conocimiento del usuario, se debe comunicar al mismo qué información se recoge, cómo se obtiene y cómo ésta va a ser tratada posteriormente, indicando claramente si va a ser almacenada o comunicada a terceros.

Por otro lado, en lo referente al tratamiento de la información, la normativa indica claramente que “los datos personales deben ser tratados de manera leal y lícita”. Un procesamiento leal de la información se define como “recogidos con fines determinados, explícitos y legítimos, y no sean tratados posteriormente de manera incompatible con dichos fines”. En esta normativa, también se recoge que los datos deben ser lo suficientemente precisos para no perjudicar al usuario y que la información no podrá ser almacenada más tiempo del necesario para lograr el objetivo pretendido, debiendo de borrarse debidamente una vez alcanzado.

Así pues, junto al sistema se deberá incorporar, por ley, una documentación formal que detalle todos estos aspectos y que esté a plena disposición de los usuarios. Primero, en términos del funcionamiento del sistema a la hora de obtener los datos del paciente necesarios para realizar las terapias de rehabilitación. Luego, la finalidad de la recogida y tratamiento de esa misma información personal.

7.2. Certificados Clínicos de Actividad

El proyecto NaoTherapist se en una actividad delicada, debido a que el sistema será utilizado por usuarios con diferentes enfermedades o discapacidades físico-cognitivas. Por tanto, es de vital importancia cuidar a estos usuarios, ya que cualquier fallo puede repercutir gravemente en su salud. Entonces, se debe tener alguna manera de poder asegurarse de su correcto, seguro y saludable funcionamiento. Esto se realiza a través del cumplimiento de un conjunto de directivas y certificados de salud que toda herramienta tecnológica de este tipo debe cumplir.

A continuación, se presentan estos certificados requeridos:

- ***R & TTE Directive 1999/5/EC***: Esta directiva asegura el cumplimiento de requisitos esenciales de seguridad y salud en lo referente a ondas electromagnéticas y de radio.
- ***ETSI EN 300 328 y ETSI EN 301 983***: Estos son estándares de las características que deben cumplir aquellos sistemas que empleen redes Wifi o Bluetooth con bandas de frecuencia de 2,4Ghz y 5Ghz respectivamente.

- ***FCC Part 15, ARIB-STD-T66 & ARIB-STD-T71***: Distintas certificaciones que muestran el cumplimiento de unas especificaciones estándar en sistemas que emplean la comunicación por radio.
- ***EN 55022 / CISPR22, EN 55024 / CISPR24***: Directiva que regula las cargas electrostáticas que debe poseer todo sistema electrónico, de manera que cumpla los límites de seguridad y salud para las personas.
- ***ETSI EN 301 489-1, ETSI EN 301 489-17***: Directivas que especifican las condiciones a cumplir por las transmisiones de datos producidas en los sistemas, certificando que cumplen los requisitos de seguridad adecuados.
- ***ISO-13482:2014***: Estándar ISO que recoge los diferentes requisitos que debe cumplir una plataforma robótica que interactúe directamente con usuarios humanos, con el fin de asegurar un diseño seguro para la salud de dichas personas.
- ***IEC/EN 62479***: Certificado que demuestra que un sistema electrónico cumple con las restricciones de salud relativas a la exposición a campos electromagnéticos.
- ***IEC/EN 60950***: Certificado que demuestra que un sistema tecnológico cumple las condiciones adecuadas de seguridad (eléctricas, energéticas, químicas, ...).
- ***IEC/EN 60601***: Certificado que verifica la seguridad y efectividad de equipos eléctricos médicos, siendo un requisito imprescindible para su comercialización. Éste será tratado con mayor detalle en el subapartado 7.2.1.

Como puede verse, el cumplimiento de la mayoría de estos certificados están directamente relacionados con el hardware, por lo que su cumplimiento está asegurado al emplear componentes que, oficial y formalmente, cumplen con dichos requisitos, como el robot NAO y el sensor Kinect v2, los cuales ya cumplen con dichas directivas. No obstante, dos de ellos sí que son dependientes de la forma en que el sistema haya sido desarrollado: los estándares ISO-13482:2014 e IEC/EN 60601. Una mayor importancia recibe el segundo, cuyo certificado de aplicación formal es requerida para la comercialización y uso de cualquier herramienta médica en centros hospitalarios.

7.2.1. Certificado IEC/EN 60601

IEC 60601 es una serie de más de 70 estándares técnicos para la seguridad y efectividad de sistemas médicos eléctricos, publicada por la IEC (*International Electrotechnical Commission*)¹. Su equivalente a nivel europeo son los estándares EN (*European Normalization*) 60601, otorgados por el Comité Europeo de Normalización.

Resulta ser el certificado de mayor importancia de entre todos los expuestos, pues es aquel que demuestra no solo la seguridad del equipo, sino su efectividad a la hora de conseguir beneficios en los pacientes a los cuales está dedicado el equipo. Además, la marca de producto 'CE', que demuestra la aplicación de éste estándar, es requerida para la comercialización de equipos médicos.

De esta manera, esta serie de estándares se aplica a todos los sistemas eléctricos médicos, definidos formalmente como toda herramienta médica que posea una aplicación relacionada con la transmisión de una energía al paciente o desde el mismo, o con la detección de dicha energía. Esta aplicación deberá estar, además, directamente relacionada con el diagnóstico, tratamiento o monitorización del paciente, o la compensación o alivio de una enfermedad, lesión o discapacidad. El sistema NaoTherapist se incluye en esta definición, puesto que mediante el uso de infrarrojos el sensor detecta a un usuario y le guía en una sesión de terapia con el fin de conseguir su rehabilitación.

Así pues, tras su tercera revisión realizada en 2015, el IEC/EN 60601 incluye un total de 80 partes, cada una de las cuales trata un estándar en particular, también denominados estándares colaterales. Éstos definen todos los requisitos a cumplir por el sistema para obtener el certificado sin perder detalle, desde lo referido a ondas electromagnéticas, tratado en la primera parte, hasta los requisitos a cumplir por un diagnóstico de imagen hecha mediante rayos X. Claro está que no todos estos requisitos son aplicables a todos los sistemas, sino que se deben buscar aquellas partes que tienen relación con el sistema desarrollado, como en el caso de este proyecto la parte 2-49, dedicada exclusivamente a sistemas de monitorización de pacientes multifuncionales (IEC/EN 60601-1-49).

¹www.bsigroup.com/medical-devices/our-services/en-60601/ - Último acceso el 17/08/2017

7.3. Registro de Modelos de Utilidad

Un Modelo de Utilidad es un título acreditativo que reconoce el derecho de explotar en exclusiva una invención, impidiendo que otros puedan reproducirla, venderla o utilizarla sin el consentimiento del titular. Sin embargo, el modelo de utilidad, aunque protegido frente a réplicas, estará a disposición del público general para su conocimiento, según se manifiesta en la Ley 24/2015 de Patentes [BOE, 2015].

Puede verse con esto que el derecho otorgado por un modelo de utilidad no es tanto el derecho a la fabricación, ofrecimiento en el mercado y empleo del objeto del modelo, sino, sobre todo, excluir a otros agentes de todo derecho sobre el producto patentado. Por tanto, los Modelos de Utilidad también son una parte importante del proyecto, obteniendo así un derecho de propiedad intelectual que, a pesar de no ser tan restrictivo como una patente, evita réplicas del sistema durante un periodo de tiempo de 10 años.

En España, la solicitud del modelo debe realizarse mediante el Registro de Patentes y Marcas, habiendo una opción de vía telemática a través de su portal web. La documentación que integra dicha solicitud se compone de:

- Documento de solicitud del modelo de utilidad donde se identifica el solicitante.
- Descripción detallada de la invención, incluyendo esquemas y representaciones gráficas.
- Reivindicación de los motivos por los que se solicita la protección de la invención, y las características concretas a proteger.
- Justificante del pago de las tasas de solicitud, de un total de 85,32 Euros.

Tras presentar esta solicitud, la invención pasa un examen minucioso por parte de un tribunal. El tribunal comprobará que se cumplen los requisitos que debe tener todo Modelo de Utilidad. Estos requisitos son: novedad, cuando no esté comprendido en el estado de la técnica, es decir, no haya ninguna otra invención patentada similar; actividad inventiva, cuando no es resultado del uso de una técnica obvia para un experto en la materia, es decir, su invención tiene cierta complejidad cognitiva; y aplicación industrial, cuando puede ser desarrollado en cualquier tipo de industria. A medida que va superando los diferentes exámenes, se tendrán que ir pagando más tasas, llegando a pagar un total aproximado de 2.800 Euros.

Capítulo 8

Entorno Socio-Económico

Este octavo capítulo del documento trata algunos factores económicos y sociales de importancia en el desarrollo del proyecto. La primera parte (sección 8.1) consistirá en una exposición de la planificación del proyecto, realizada de forma previa al inicio del mismo, donde a su vez se definirán las principales fases y tareas que lo han formado. Tras esto, en el apartado 8.2, también se proporcionará una descripción sobre los costes incurridos durante la realización del proyecto, debido al uso de diferentes recursos, tanto de carácter material como humano. A continuación, se presentan distintos informes sobre el impacto comercial, económico y social que el desarrollo de este proyecto NaoTherapist podría implicar, en las secciones 8.3, 8.4 y 8.5 respectivamente.

8.1. Planificación

Todo proyecto debe incluir una planificación detallada inicial definida en base a las tareas necesarias para su correcta realización, con el fin de poder organizar el tiempo de trabajo dedicado a cada tarea, aunque esta organización luego pueda sufrir cambios en el proceso desarrollo. De esta manera, en proyectos con una fecha de finalización concreta, como es el caso, es una herramienta con la que garantizar el cumplimiento de los diferentes objetivos en una fecha concreta.

Se comienza con esta planificación definiendo las tareas cuya realización estaba prevista inicialmente, todas ellas divididas en las típicas fases de desarrollo de cualquier proyecto de desarrollo software, en las que también se estructura parte de este documento:

1. Planteamiento del Problema:

- 1.1. Primera Reunión con el Tutor
- 1.2. Familiarización con la arquitectura NaoTherapist
- 1.3. Primera Reunión con los responsables del Campamento HABIT
- 1.4. Revisión Bibliográfica

2. Análisis de los Sistemas:

- 2.1. Toma de Requisitos de HABIT (segunda reunión con responsables)
- 2.2. Borrador de Escenarios y Casos de Uso
- 2.3. Entrevistas con Médicos, Fisioterapeutas y Terapeutas
- 2.4. Perfeccionamiento de Escenarios y Casos de Uso
- 2.5. Especificación de Requisitos del Sistema
- 2.6. Revisión de Requisitos con los responsables del Campamento

3. Diseño e Implementación de Componentes:

- 3.1. Actualización del Reconocimiento de Poses
 - 3.1.1. Integración del Sensor Kinect v2
 - 3.1.2. Creación del Modelo Antropométrico
 - 3.1.3. Desarrollo de la Interfaz Gráfica de *Vision*
 - 3.1.4. Generación del Catálogo de Poses
 - 3.1.5. Desarrollo del Sistema de Comparación de Poses
- 3.2. Modificación de la Planificación Automática de Sesiones
 - 3.2.1. Generalización del Dominio de Planificación
 - 3.2.2. Modelado del Juego 'Mirror'
 - 3.2.3. Modelado del Juego 'Memory'
 - 3.2.4. Modelado del Juego 'Inverse Memory'
 - 3.2.5. Modelado del Juego 'Nao Says'
- 3.3. Creación del Sistema de Adaptación al Usuario
 - 3.3.1. Modelo de Umbrales Personales
 - 3.3.2. Modelo de Adaptación de Poses
 - 3.3.3. Modelo de Personalización de Sesiones

4. Pruebas y Experimentación:

- 4.1. Pruebas del Sistema de Reconocimiento de Poses
- 4.2. Pruebas de la Planificación de Sesiones
- 4.3. Pruebas del Sistema de Adaptación al Usuario

5. Elaboración de la Documentación

El proyecto se inició en junio de 2016, con la primera reunión con el tutor, José Carlos Pulido. Luego, tras la primera reunión con los organizadores del campamento de terapia intensiva en julio de 2016, se estableció que el desarrollo del proyecto debía estar terminado para el 16 de julio de 2017, momento en el que comenzaría dicho campamento. Quedando entonces el mes de agosto de 2017 para la elaboración de la documentación.

Se determinó que el tiempo de trabajo sería de alrededor de unas 3 horas diarias, durante un total de 64 semanas, 1 año y 3 meses de trabajo. En el tiempo de trabajo no se cuentan los fines de semana ni 6 semanas concretas por motivos de vacaciones. Por tanto, el trabajo se reparte en 58 semanas laborables, lo que supone un total de 290 días u 870 horas.

A continuación, en la figura 8.1, se presenta el diagrama de Gantt en el que se incluye la distribución de tiempo necesario para cada una de las principales fases de desarrollo mencionadas anteriormente. Después, en el resto de figuras se mostrará el tiempo de trabajo desglosado por tareas. Así, en la figura 8.2 se detalla la planificación de la fase de Planteamiento del Problema, en la figura 8.3 el Análisis, con las figuras 8.4, 8.5, 8.6 y 8.7 se describen las tareas de Diseño e Implementación y, por último, la figura 8.8 muestra la fase de Pruebas.

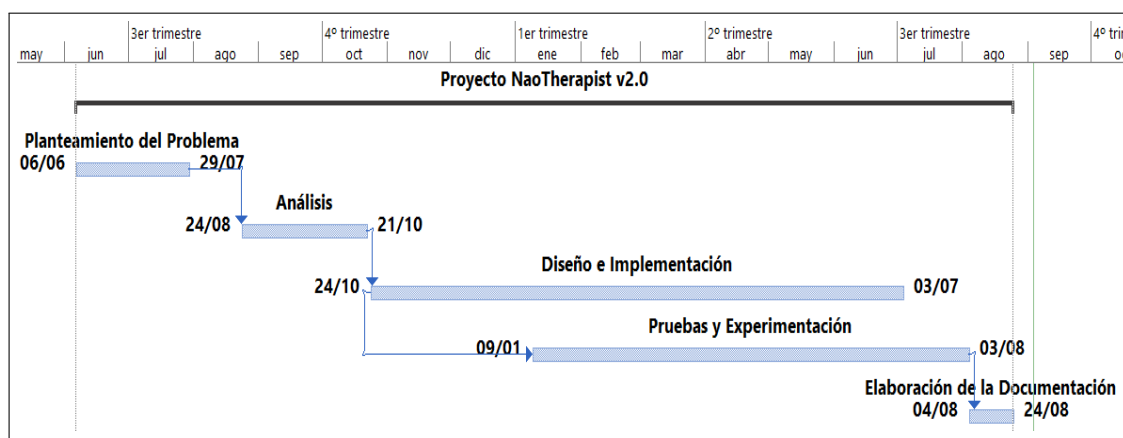


Figura 8.1: Diagrama de Gantt del Proyecto (Vista General).

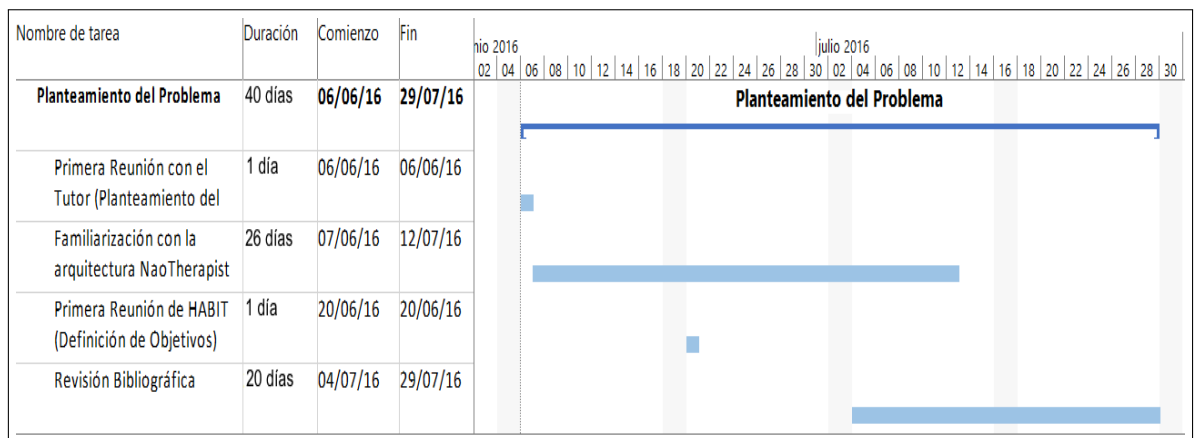


Figura 8.2: Diagrama de Gantt del Proyecto (Fase de Planteamiento).

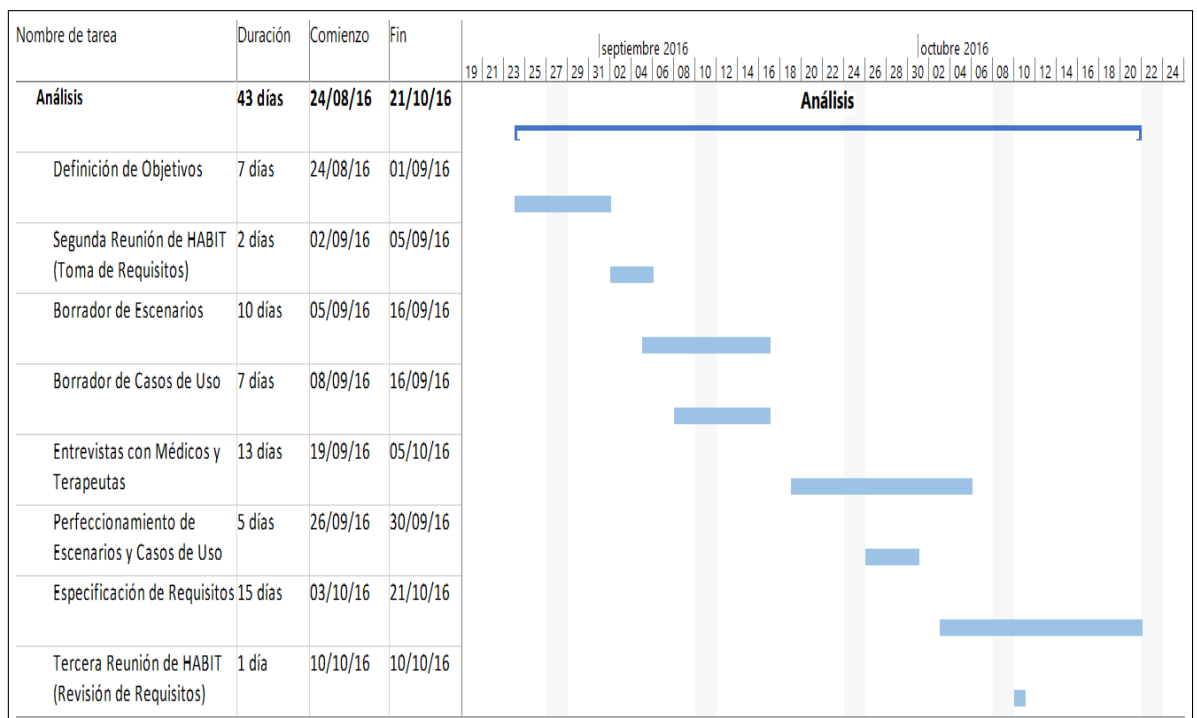


Figura 8.3: Diagrama de Gantt del Proyecto (Fase de Análisis).

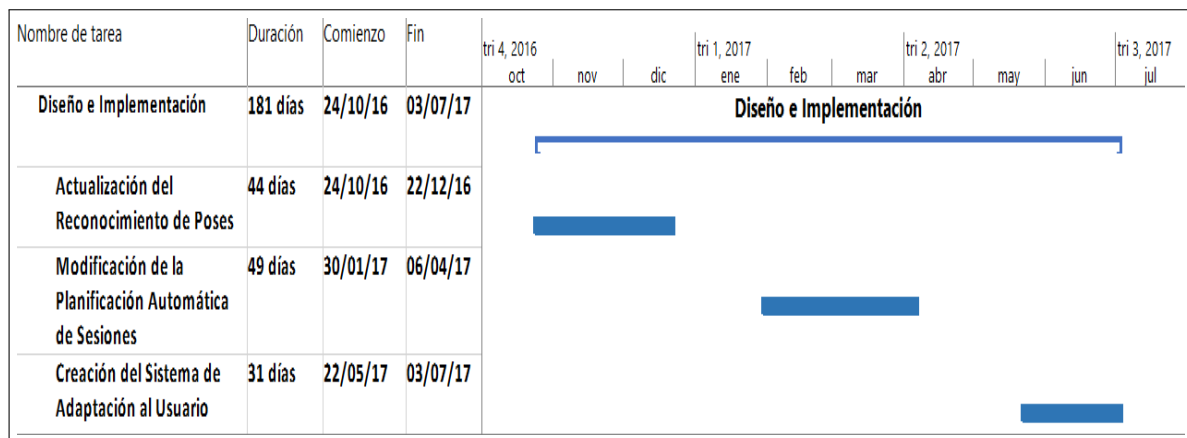


Figura 8.4: Diagrama de Gantt del Proyecto (Fase de Diseño e Implementación).

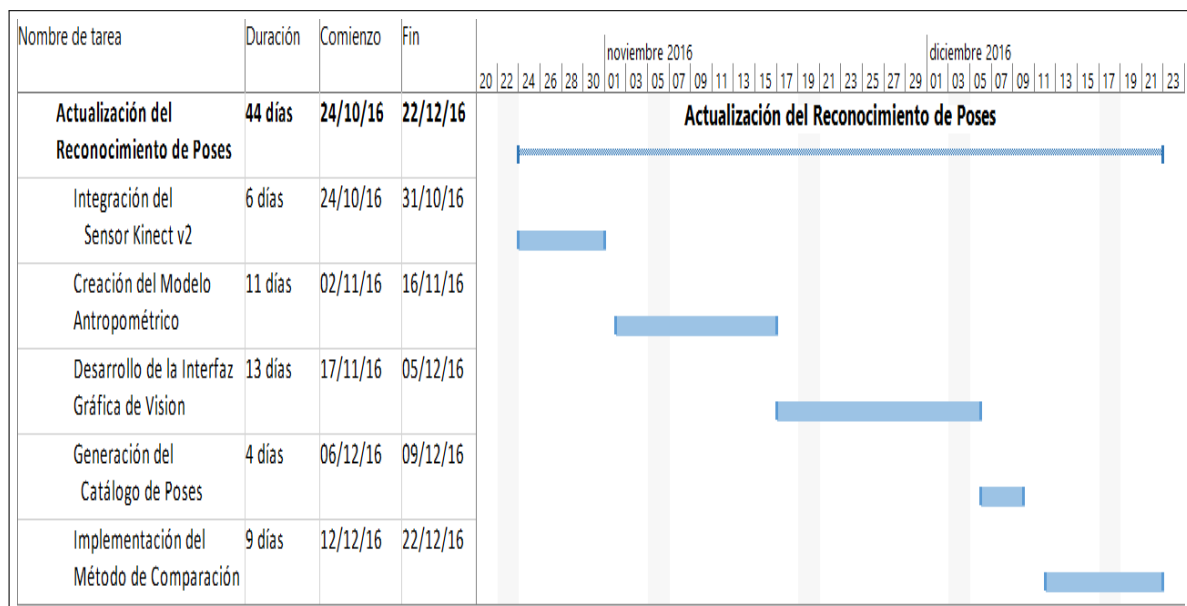


Figura 8.5: Diagrama de Gantt del Proyecto (Tarea de Reconocimiento de Poses).

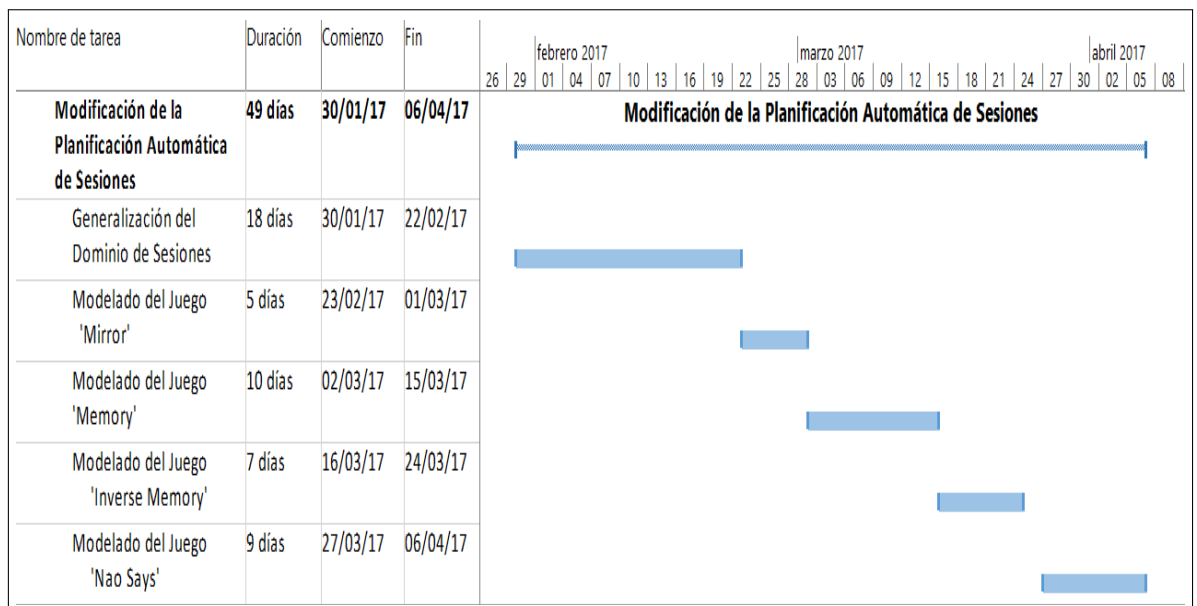


Figura 8.6: Diagrama de Gantt del Proyecto (Tarea de Planificación de Sesiones).

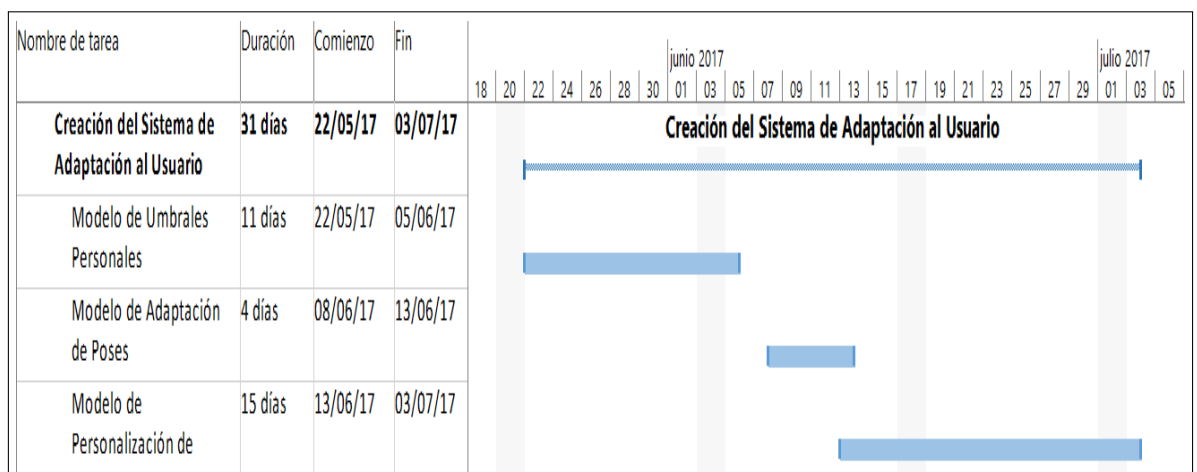


Figura 8.7: Diagrama de Gantt del Proyecto (Tarea de Adaptación al Usuario).

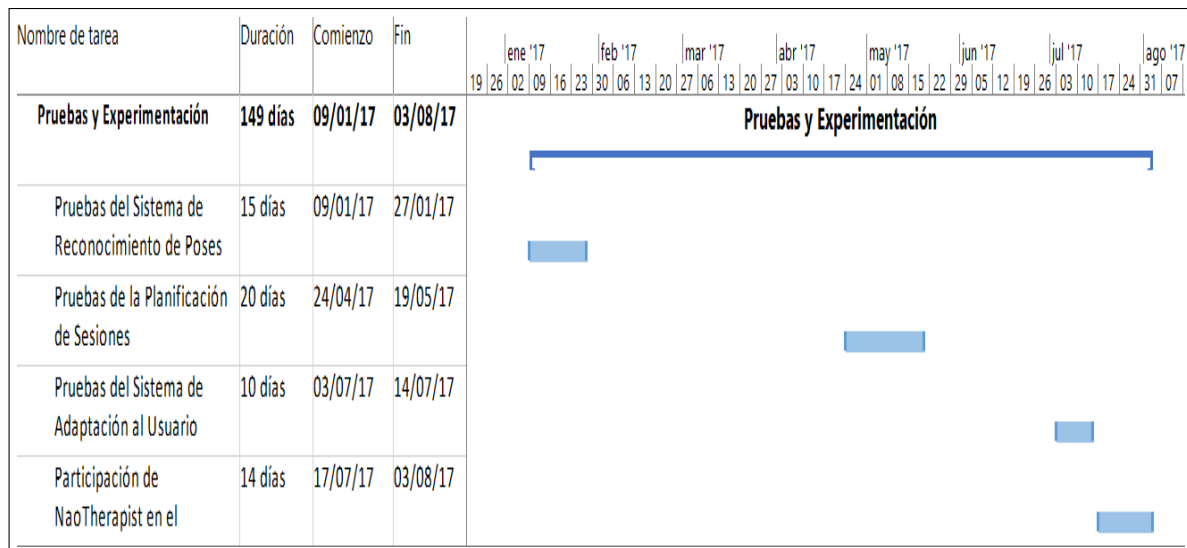


Figura 8.8: Diagrama de Gantt del Proyecto (Fase de Experimentación).

8.2. Presupuesto

Otro elemento de importancia en la gestión de un proyecto de desarrollo es el coste incurrido para la realización de éste, presentado aquí a través de un presupuesto. Para la elaboración de este presupuesto se han tenido en cuenta todos los costes materiales, como el hardware empleado y otros fungibles y provisiones que han sido necesarios, y los costes de personal, referente a los recursos humanos.

Aunque los detalles del presupuesto se expondrán más adelante, el resumen del presupuesto del proyecto se presenta en la siguiente tabla (8.1).

Los diferentes costes se presentan primero sin impuestos, a los que luego se suman los correspondientes impuestos del IVA (21 %) a los costes materiales y del IRPF y Seguridad Social (24 % en total) a los costes de personal. Por último, también se añade un margen de maniobra del 10 % para posibles gastos imprevistos inicialmente. Así, con todo ello, se estima un coste del proyecto de aproximadamente 37.162,90 Euros.

PRESUPUESTO DEL PROYECTO			
Elemento	Coste sin Imp. (€)	Impuestos (€)	Coste (€)
Costes de Recursos Materiales	2.762,36 €	580,10 €	3.342,46 €
<i>Costes de Hardware</i>	2.318,56 €	486,90 €	2.805,45 €
<i>Costes de Software</i>	305,80 €	64,22 €	370,02 €
<i>Costes de Aprovisionamiento</i>	138,00 €	28,98 €	166,98 €
Costes de Recursos Humanos	24.550,00 €	5.892,00 €	30.442,00 €
Margen de Maniobra (10%)			3.378,45 €
IMPORTE TOTAL DEL PRESUPUESTO (€)			37.162,90 €

Tabla 8.1: Resumen del Presupuesto del Proyecto.

8.2.1. Recursos Materiales

Entre los recursos materiales que han sido necesarios para la elaboración de este proyecto se encuentran algunos de elevado coste económico, como el robot NAO y los dos ordenadores portátiles necesarios para montar la arquitectura NaoTherapist sobre la que trabajar. Otro hardware necesario ha sido un router, mediante el cual se comuniquen los diferentes componentes de la arquitectura, y dos cables de red. Por otra parte, también se debe incluir el software utilizado, aunque la mayoría de programas o librerías empleadas eran de código abierto o uso gratuito. Otros costes indirectos son los gastos en Internet y Electricidad.

No obstante, el proyecto ha sido elaborado en el Departamento de PLG (*Planning and Learning Research Group*) de la Universidad Carlos III de Madrid, por lo que el material utilizado no ha sido adquirido especialmente para este proyecto, sino que es propiedad de dicho departamento. Así pues, solo se imputará el coste correspondiente a la amortización acumulada de estos elementos materiales durante el periodo en el que han sido usados para este proyecto, asumiendo así solo parte de su coste de adquisición. Este coste de amortización incurrido se calcula dividiendo el importe total de su valor entre el número de meses de su vida útil, lo que luego se multiplica por el número de meses que ha durado este proyecto, que recordando lo expuesto en la sección 8.1 son 15 meses. Todo esto considerando que el valor residual de todo el equipo de trabajo es 0 tras finalizar periodo de depreciación.

En las siguientes tablas, 8.2, 8.3 y 8.4, se detallan los costes de recursos materiales:

DESGLOSE DE HARDWARE EMPLEADO				
Elemento	Precio sin IVA (€)	Vida Útil (meses)	Periodo de Uso (meses)	Coste Incurrido (€)
<i>Robot NAO</i>	5.790,00 €	60	15	1.447,50 €
<i>Sensor Kinect v2</i>	118,50 €	60	15	29,63 €
<i>Adaptador Kinect v2 a PC</i>	39,50 €	60	15	9,88 €
<i>PC Portátil Sony Vaio</i>	1.185,00 €	36	15	493,75 €
<i>PC Portátil Toshiba Tecra</i>	790,00 €	36	15	329,17 €
<i>Router</i>	15,80 €	48	15	4,94 €
<i>Cables de Red</i>	11,85 €	48	15	3,70 €
COSTES TOTALES DE HARDWARE (€)				2.318,56 €

Tabla 8.2: Presupuesto de Hardware del Proyecto.

DESGLOSE DE SOFTWARE EMPLEADO				
Elemento	Precio sin IVA Licencia (€)	Vida Útil (meses)	Periodo de Uso (meses)	Coste Incurrido (€)
<i>SO Windows 8.1</i>	94,80 €	36	15	39,50 €
<i>SO Linux Ubuntu 12.04</i>	Free	36	15	0,00 €
<i>Microsoft Kinect SDK</i>	Free	60	15	0,00 €
<i>Aldebaran NAOqi Webots</i>	90,00 €	60	15	22,50 €
<i>Aldebaran Choregraphe</i>	270,00 €	60	15	67,50 €
<i>Visual Studio 2017</i>	Free	48	15	0,00 €
<i>Pyglet</i>	Free	48	15	0,00 €
<i>PyQT</i>	Free	48	15	0,00 €
<i>Microsoft Office 2016</i>	117,71 €	12	15	147,14 €
<i>Sublime Text 2 Editor</i>	70,00 €	36	15	29,17 €
COSTES TOTALES DE SOFTWARE (€)				305,80 €

Tabla 8.3: Presupuesto de Software del Proyecto.

DESGLOSE DE OTROS GASTOS DE APROVISIONAMIENTO				
Elemento	Coste por mes sin IVA (€)	Periodo de Uso (meses)	Porcentaje Incurrido (%)	Coste Incurrido (€)
<i>Internet Fibra Óptica</i>	26,20 €	15	12,5 %	49,13 €
<i>Electricidad</i>	47,40 €	15	12,5 %	88,88 €
COSTES TOTALES DE APROVISIONAMIENTO (€)				138,00 €

Tabla 8.4: Presupuesto de Otros Aprovisionamientos del Proyecto.

8.2.2. Recursos Humanos

En cuanto a los recursos humanos empleados para la realización del presente proyecto, únicamente ha participado el alumno autor del mismo. Por ello, la misma persona ha empleado diferentes roles a lo largo del proyecto, desde Jefe de Proyecto hasta Técnico de Prueba. Así, en la tabla 8.5, se exponen todos los roles adoptados, junto al correspondiente coste de trabajo por hora y al número de horas empleadas en dicho rol.

DESGLOSE DE RECURSOS HUMANOS				
Rol de Trabajo	Recurso	Coste por Hora (€)	Horas de Trabajo (h)	Coste Incurrido (€)
<i>Jefe de Proyecto</i>	Enrique García	40,00 €	120 h	4.800,00 €
<i>Analista</i>	Enrique García	30,00 €	310 h	9.300,00 €
<i>Programador</i>	Enrique García	25,00 €	330 h	8.250,00 €
<i>Técnico de Pruebas</i>	Enrique García	20,00 €	110 h	2.200,00 €
COSTES TOTALES DE PERSONAL (€)				24.550,00 €

Tabla 8.5: Presupuesto de Recursos Humanos del Proyecto.

8.3. Análisis Comercial

Como podrá verse en el siguiente apartado, un proyecto de estas características supone una gran oportunidad de emprendimiento empresarial, puesto que sería relativamente fácil llevar este proyecto de investigación a una forma más empresarial. Sin embargo, antes de aprovechar económicamente un proyecto así, es necesario realizar un análisis comercial, con el que poder definir los potenciales clientes del producto y comprobar que su salida al mercado sería exitosa.

En primer lugar, tras haber visto a lo largo de este documento la idea de negocio de un robot terapeuta, queda bastante claro cuál sería el posicionamiento de NaoTherapist sobre el Mercado de Referencia. En Marketing, para segmentar un Mercado, normalmente éste se divide en base a los criterios de necesidades, consumidores y tecnologías existentes. Así, en este caso, existen varias necesidades a cubrir en las terapias de rehabilitación física: realización correcta de ejercicios de terapia, aumento de la motivación de los pacientes, toma de datos antropométricos y seguimiento clínico de pacientes. Por otro lado, los usuarios o pacientes pueden dividirse por rangos de edad en: edad pre-escolar, de 0 a 4 años; escolar, entre 5 y 12; adolescencia, de 13 a 17 años; adultos, entre 18 y 65; y tercera edad, mayores de 65 años. Por último, las posibles tecnologías a usar en estas terapias son: robótica, asistentes virtuales, exoesqueletos y realidad virtual. Con esta segmentación realidad, puede verse claramente cuál sería el Mercado de Referencia en el que se posicionaría NaoTherapist, intentando mediante un sistema basado en el uso de un robot terapeuta satisfacer todas las necesidades de los terapeutas mencionadas anteriormente en terapias de rehabilitación infantil, con niños en edad escolar. En la figura 8.9, puede observarse gráficamente la división inicial del mercado, y el mercado de referencia aplicable a la plataforma desarrollada en el proyecto NaoTherapist.

Luego, dentro de este Mercado de Referencia, se realiza otra división denominada micro-segmentación, en la que se estudian las preferencias de los posibles compradores de la plataforma, los cuales serán hospitales, clínicas u otras organizaciones médicas, donde acuden los pacientes de rehabilitación. Dividiendo a estas organizaciones en grupos con características similares, se tienen en cuenta los siguientes factores: tamaño o tipo de organización médica, distinguiendo entre grandes hospitales y pequeñas clínicas privadas, y la frecuencia con la que usarían una herramienta tecnológica de apoyo en las terapias. De esta forma, NaoTherapist se centraría en organizaciones médicas con presupuesto económico amplio, ya que que podrían permitirse el coste del sistema, y que le vayan a dar un uso regular al producto, puesto que podrían rentabilizar en gran medida su alto coste.

Mercados de Referencia

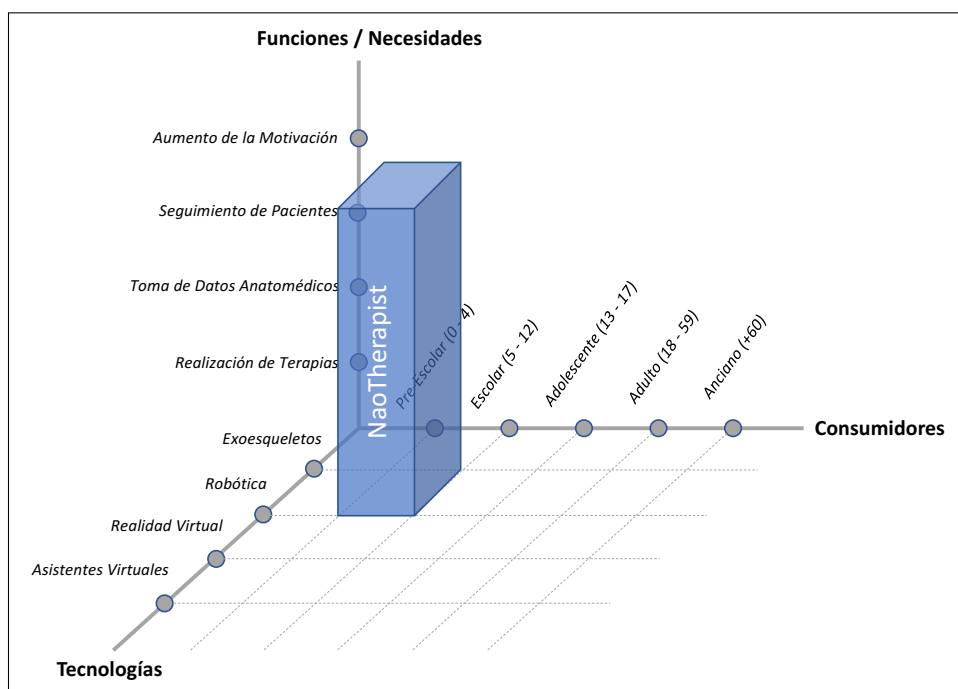


Figura 8.9: Mercado de Referencia Aplicable a NaoTherapist.

Entonces, con estas características de los clientes potenciales, se puede determinar el número de unidades médicas de rehabilitación o fisioterapia en las que se podrían llevar a cabo sesiones de terapia con la plataforma NaoTherapist.

■ **Asociaciones¹:**

Parálisis Cerebral: 88

Plexo Braquial: 2

Rehabilitación Pediátrica: 9

Rehabilitación General: 320

■ **Centros Médicos y Clínicas²:**

Rehabilitación Pediátrica: 32

Rehabilitación General: 571

■ **Hospitales³:**

Rehabilitación Pediátrica: 753

Rehabilitación General: 4356

¹<https://sede.mir.gob.es/nfrontal/webasocia2.html> - Último acceso el 21/03/2017

²<http://www.paginasamarillas.es/search/rehabilitacion-fisica/> - Último acceso el 21/03/2017

³<http://www.msssi.gob.es/centrosServiciosSNS/hospitales/> - Último acceso el 21/03/2017

De entre todas las organizaciones médicas mostradas, interesarían más aquellos centros que se categorizan a sí mismos como pediátricos, ya que NaoTherapist se centra en este nicho de mercado. No obstante, el resto de centros de rehabilitación general también pueden tener servicios de pediatría, por lo que se considerará que el 10 % de estos puedan llegar a ser clientes. Por tanto, bajo estas suposiciones, habría un total de 1.408 centros hospitalarios que serían clientes potenciales del sistema NaoTherapist.

8.4. Emprendimiento Económico

Con el análisis comercial visto en la sección 8.3 anterior, se observa una buena oportunidad de negocio. Por este motivo, en este apartado, se exponen los aspectos fundamentales de la idea de negocio basada en la plataforma NaoTherapist. Cabe decir que este plan de negocio ha sido el otro proyecto de fin de grado realizado por el mismo autor del tratado en este documento [García Estévez, 2017], para la parte de Administración y Dirección de Empresas del doble grado.

Los fisioterapeutas y doctores que traten niños con discapacidades físicas o motoras deben estar altamente cualificados en el arte de la motivación y distracción, pero dicha motivación suele suponer un elevado coste en tiempo y recursos. Además, a pesar de sus esfuerzos, no siempre se obtienen buenos resultados en las sesiones de terapia. Para solucionar esto, la empresa NaoTherapist propondría el uso de las nuevas tecnologías durante el transcurso de estas sesiones de rehabilitación. Concretamente, se apuesta por el desarrollo de una plataforma tecnológica, en la que se integra un robot humanoide llamado NAO que guíe las terapias, el candidato ideal para que los pacientes colaboren y estén motivados durante todo el proceso de rehabilitación.

La empresa se especializaría, en un primer momento, en sesiones de rehabilitación de niños en edad escolar, con edad comprendida entre los 5 y los 10 años. No obstante, uno de los objetivos a largo plazo de la empresa, cuando ya esté asentada en este mercado tan concreto, podría ser introducirse en nuevos mercados con productos adaptados específicamente al resto de mercados de referencia presentes en el sector de la tecnología para la rehabilitación.

El valor diferencial de NaoTherapist recae en el software desarrollado, que integra en una misma arquitectura diversos componentes como el robot y el sensor de movimiento. Este software es único en el mercado, estando diseñado acorde tanto para las necesidades de los terapeutas, como para las necesidades de los pacientes. Con ello, permite que los terapeutas preparen sesiones adaptadas a las necesidades médicas y motivadoras de los pacientes.

Otra de las ventajas competitivas de NaoTherapist podría encontrarse en el trato personal con los clientes, consiguiendo así su fidelización al producto y a la marca. Así, junto a la plataforma tecnológica, se proporcionarían una serie de servicios añadidos, con los cuales se tendría un contacto directo con los clientes. Tras cada venta, un empleado técnico experto en el producto acudiría al centro hospitalario del cliente para ofrecer los servicios de instalación, formación y familiarización de la herramienta, además de un posterior servicio de soporte técnico.

Respecto al entorno competitivo, al tratarse de un negocio innovador, no existe una elevada tensión competitiva en el sector, con muy pocas empresas dedicadas al desarrollo de nuevas tecnologías para la rehabilitación. A pesar de esto, la entrada al mercado no sería fácil, fundamentalmente por las grandes barreras de entrada como la elevada inversión inicial necesaria, la existencia de economías de escala y de aprendizaje, y la necesidad de ciertos certificados de actividad (descritos en el capítulo 7).

Dadas las ventajas competitivas del producto a comercializar, lo más adecuado sería pensar en una estrategia competitiva orientada a la diferenciación. Ésta se conseguiría con la adaptación del diseño de la plataforma tanto a los terapeutas como a los pacientes, tal y como ya se ha comentado, y la capacidad para que los terapeutas puedan diseñar fácilmente sesiones personalizadas para los niños. Con ello, se pretende conseguir un software y, por consiguiente, una plataforma únicos en el mercado, marcando la diferencia con la competencia.

Por otra parte, no debe dejarse de lado el aspecto económico en la estrategia competitiva, debido a la citada presencia de economías de escala y de aprendizaje en el sector. Por tanto, en parte también se seguiría una estrategia de ventaja en costes, procurando siempre que el coste de desarrollo de la plataforma sea el mínimo posible, siempre y cuando se puedan obtener características diferenciadoras.

Según varios cálculos realizados, para acometer este negocio a gran escala con garantías, se necesitaría una inversión inicial de aproximadamente 740.000 Euros. La financiación se podría obtener de varias fuentes, incluyendo entidades bancarias u organizaciones públicas y privadas subvencionadoras. Tras dicha inversión inicial, con las ventas previstas en el escenario más probable, se empezarían a obtener beneficios al segundo año de actividad, y en el tercer año se compensarían todas las pérdidas acumuladas durante el primer año de actividad, con una tasa interna de rentabilidad (TIR) del 17,27 %.

8.5. Impacto Social

Existen evidencias científicas de como el uso de las nuevas tecnologías en los proceso rehabilitación de niños y adultos mejora en la consecución de los objetivos terapéuticos, pero actualmente es escasa la evidencia del impacto que tiene la utilización de robots humanoides en la rehabilitación de usuarios menores de edad.

A cotninuación, se destaca el impacto social de este proyecto, existente en una doble vertiente por el uso de plataformas robóticas como NaoTherapist en los proceso de rehabilitación, que serían las siguientes:

1. Impacto en los usuarios finales, que en este caso son los pacientes menores, con edades comprendidas entre los 4 y 13 años y algún tipo de discapacidad. Los pacientes que más se podrían adaptar a este tipo de terapia con NAO serían aquellos con limitaciones osteoarticulares.
2. Impacto en los profesionales de ámbito sociosanitario, es decir, terapeutas ocupacionales, fisioterapeutas y médicos rehabilitadores que son usuarios de la herramienta a la hora de diseñar las terapias y usarla como apoyo durante las mismas.

Los últimos datos estadísticos realizados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) con referencia a niños con algún tipo de limitación físico-cognitiva fueron obtenidos en el 2018, en la Encuesta de Discapacidad, Autonomía Personal y Situaciones de Dependencia (*EDAD-2008*). En dicha encuesta se incluye como personas con discapacidad a aquellas que poseen “limitación importante para realizar las actividades de la vida diaria que haya durado o se prevea que vaya a durar más de un año y tenga su origen en una de ciencia. Se considera que una persona tiene una discapacidad aunque la tenga superada con el uso de ayudas técnicas externas o con la ayuda o supervisión de otra persona (exceptuando el caso de utilizar gafas o lentillas)”. Entre los resultados de esta encuesta destaca que el 2,8 % de los niños de 0 a 5 años poseen algún tipo de limitación, y con edades entre 5 y 15 años este porcentaje disminuye al 2,2 %. De estas discapacidades, el origen de dicha discapacidad es osteomuscular en el 5,2 % de los casos, siendo esta población los pacientes objetivo de NaoTherapist. Además, destaca aquí que el 61,6 % de los niños discapacitados de entre 5 y 15 años padecen deficiencia mental, pudiendo ellos también beneficiarse de la terpia con NaoTherapist, ya que en la mayoría de los casos poseen un retraso en el desarrollo motor bastante significativo.

La gran mayoría de menores a los que se les diagnostica la discapacidad o el retraso madurativo, una vez son diagnosticados, comienzan un proceso de habilitación, rehabilitación y adaptación del entorno, el cual en la mayoría de los casos dura toda la vida, pasando por multitud de terapias convencionales o alternativas. Aunque la mayoría de estas terapias están basadas en el juego y tienen en cuenta la motivación del paciente, en una buena parte de los casos se vulnera de alguna manera el artículo 12 de la *Convención de los Derechos del Niño* [Español, 2016]. En este artículo se expone que “el niño tiene derecho a expresar su opinión libremente en todos los asuntos que le afecten”, algo que también se menciona en el artículo 7.3 de la *Convención de los Derechos de las Personas con Discapacidad* [de Naciones Unidas (ONU), 2006].

Con el uso de NaoTheapist en las terapias se consigue que el niño participe activamente en su propia terapia, ya que el robot permite que cambie drásticamente la forma de llevar a cabo sus sesiones de rehabilitación, siendo un factor motivacional de importancia. Por otro lado, el hecho de emplear la kinect para capturar el movimiento y el nuevo sistema de adaptación al usuario permite una calibración de la herramienta totalmente individualizada, reajustándose continuamente de forma autónoma, y un diseño personalizado a las necesidades del paciente. Además, durante las sesiones, el niño recibe un feedback positivo de los ejercicios que va realizando, lo que favorece en gran medida su motivación extrínseca, generando auto-confianza y mejorando la adherencia al tratamiento.

Desde el punto de vista del profesional médico, NaoTherapist les ofrece medidas fiables de los diferentes ángulos articulares de movimientos de los niños que acuden a las sesiones de tratamiento, sin necesidad de usar otros instrumentos de medición de ángulos tradicionales. Estos métodos tradicionales son, en muchos casos, de un uso más farragoso, con medidas que, aunque pueden ser más fiables, llevan mucho tiempo obtenerse, como es el caso del goniómetro. Además, otros dispositivos más modernos, como trajes de sensores, son más invasivos para el niño, pudiendo modificar su movimiento normal, lo que podría alterar la fiabilidad o necesitar tiempo para la habituación al propio traje. Por ello, el método usado en NaoTherapist de la cámara de movimiento resulta ser menos invasivo, menos tedioso y muy aceptable en cuanto a fiabilidad, haciéndolo uno de los métodos favoritos entre dichos profesionales. Todo esto sin olvidar que la plataforma NaoTherapist, con la utilización del robot NAO, es una herramienta altamente motivadora para los pacientes, requiriendo para ello de poco esfuerzo para el terapeuta, por lo que es una herramienta de apoyo muy útil en este sentido. Cabe recalcar que, aunque con el uso de este sistema el peso de la sesión la lleve el robot, NaoTherapist no puede considerarse un sustituto del terapeuta, sino solamente una herramienta de apoyo, ya que los terapeutas pueden y deben diseñar las sesiones en base a la movilidad y gustos del paciente.

Capítulo 9

Conclusiones y Líneas Futuras

En este último capítulo del documento se incluye una discusión final sobre todo el trabajo realizado. En primer lugar, en la sección 9.1 se repasará el desarrollo realizado, exponiendo los aspectos más destacables de cada uno de los componentes diseñados e implementados, y sus respectivas implicaciones tanto en la propia plataforma como en los usuarios de la misma, incluyendo tanto a pacientes como a terapeutas. Luego, para terminar con el apartado 9.2, se presentarán algunas ideas sobre las líneas de desarrollo que podría seguir el proyecto NaoTherapist de ahora en adelante.

9.1. Conclusiones

Con el trabajo realizado se buscaba afrontar una serie de problemas surgidos de la posibilidad de emplear la plataforma NaoTherapist en un entorno de rehabilitación distinto. Se detectaron una serie de necesidades, que luego se tradujeron en nuevas funcionalidades de la plataforma. Así, con el desarrollo realizado en el trabajo se ha conseguido alcanzar el objetivo principal del mismo, que consistía en elaborar una nueva plataforma de robótica social e interactiva adaptada a las características de una terapia bimanual intensiva, ampliando de este modo el campo de acción del proyecto NaoTherapist.

Este proceso de desarrollo se dividía en tres partes claramente diferenciadas, en base a las necesidades presentadas por los terapeutas (sección 1.3): módulo de monitorización, nuevas actividades de rehabilitación y sistema de adaptación al usuario. A continuación se presentan las conclusiones de cada una de estos componentes, desglosadas en sus correspondientes subsecciones.

9.1.1. Módulo de Monitorización

El primer componente de NaoTherapist actualizado y mejorado de cara al campamento de terapia intensiva fue el de *Vision*. Con su desarrollo, se ha conseguido solventar uno de los problemas que presentaba la versión anterior, que basaba el cálculo de ángulos articulares en un modelo antropométrico desconocido para los terapeutas. Gracias a la ayuda de varios terapeutas, se pudo diseñar un nuevo modelo antropométrico con una nomenclatura mucho más cercana a sus conocimientos y unos cálculos basados en la biomecánica humana. Esto ha permitido que se pueda ofrecer una herramienta de apoyo a los terapeutas de mayor confianza, ya que emplea conocimientos que les son familiares.

Como consecuencia de este nuevo modelo antropométrico, también ha sido preciso modificar el método de comparación entre pose solicitada por la herramienta y pose mantenida por el paciente, puesto que ahora los datos a comparar eran diferentes. En esta nueva comparación se crea un nuevo objeto *Comparison*, que otorga una información más completa sobre la similitud entre las dos poses pasadas por parámetros.

Por otro lado, los terapeutas también demandaban en muchas ocasiones una monitorización en tiempo real de los ángulos articulares. Los cálculos necesarios ya se realizaban para crear el modelo antropométrico del paciente, por lo que tan solo era necesario desarrollar una interfaz que presentase los datos adecuadamente y realizase actualizaciones periódicas casi en tiempo real. Tras lo visto en la evaluación del campamento, esta nueva funcionalidad resulta de gran utilidad para los terapeutas y médicos, ya que les permite poder realizar diagnósticos sobre discapacidades físicas de una forma mucho más rápida y sencilla.

Relacionado también con esta interfaz, se ha incluido un nuevo modo gráfico de incluir nuevas poses al catálogo disponible para luego diseñar las sesiones de rehabilitación. Así, los terapeutas pueden crear en cualquier momentos nuevas poses que no estén incluidas por defecto en la herramienta, favoreciendo así la adaptabilidad de la plataforma a las distintas discapacidades que pueden presentar los pacientes.

9.1.2. Planificación de Sesiones

Otra de las partes de la plataforma que han sido rediseñadas en este trabajo es la planificación automática de las sesiones de terapia. Anteriormente, tan solo existían dos tipos de ejercicios o actividades a realizar con el robot NAO: *Mirror* y *Memory*. Además, estos dos juegos no podían ser integrados en una misma sesión, sino que debía reiniciarse el sistema para cambiar entre ambos.

Claramente, esto resultaba ser un grave problema en las sesiones de terapia por dos motivos. Primero, existía una pérdida importante de calidad de la interacción entre robot y paciente al cambiar de ejercicio. Y en segundo lugar, la escasa variedad de ejercicios facilitaba la posibilidad de aburrimiento de los pacientes, perdiendo progresivamente su motivación y atención, dos de las claves del uso de NaoTherapist en estas terapias de rehabilitación. Esto se acentuaba más, si cabe, en las terapias intensivas, al haber sesiones durante muchos días consecutivos. Por tanto, procurando solucionar esto, se ha trabajado en el diseño un nuevo dominio de planificación de las sesiones de terapia.

Este dominio consigue ahora integrar en una misma sesión diversos tipos de ejercicios, implementando primero un flujo general con el que controlar el orden de ejecución de cada ejercicio, además de incluir la correspondiente introducción previa al mismo y la recompensa posterior a su realización. Esto ha permitido mejorar considerablemente tanto la autonomía del robot, como la interacción del robot con los pacientes, haciendo las sesiones de rehabilitación mucho más dinámicas y entretenidas para los pacientes. Experimentalmente, además, queda demostrado cómo esta integración de los ejercicios en un mismo dominio no altera en absoluto a los tiempos de planificación, por lo que no llega a afectar a las reacciones del robot ante imprevistos no planificados como una pose mal hecha por parte del paciente.

Luego, los nuevos tipos de actividades incluidos enriquecen enormemente la plataforma, añadiendo multitud de nuevas posibilidades para el diseño de las sesiones de terapia. De esta manera, se intenta evitar el aburrimiento de los pacientes y la monotonía de la rehabilitación con el robot. Y no solo eso, sino que permiten trabajar nuevas habilidades físico-cognitivas durante la terapia, como la conciencia y la propiocepción corporal.

Todos estos nuevos casos de uso fueron debidamente probados en laboratorio, a medida que se iban desarrollando. Así, se aseguraba su correcto funcionamiento de cara al campamento de terapia intensiva, donde luego fue probado con pacientes reales.

9.1.3. Sistema de Adaptación al Usuario

Una parte importante del trabajo reside en el intento de conseguir una adaptación al usuario de la herramienta NaoTherapist. Con el desarrollo de este sistema de adaptación se ha logrado un gran avance, ya que actualmente se permite una personalización de toda la terapia de rehabilitación mucho mayor, pudiendo adaptar ésta a las características únicas de cada paciente.

En primer lugar, esta adaptación al usuario se ha desarrollado en el diseño de las sesiones de terapia, estando en este sentido relacionado con la planificación de dichas sesiones. En el dominio de planificación se han incluido diversas alternativas a escoger por los terapeutas en el diseño de las sesiones rehabilitación de sus pacientes. Los aspectos ahora configurables son muchos y muy diversos: ejercicios y poses a realizar, número de intentos máximo, tipo de corrección a realizar tras cada intento, etc... Todo ello se traduce en la posibilidad de crear terapias mucho más adaptadas a los diferentes grados y tipos de discapacidad de los pacientes, lo que puede suponer un gran beneficio en su proceso de rehabilitación.

Por otra parte, también se ha trabajado en la adaptabilidad de la dificultad de los ejercicios a cada individuo. Esto se ha realizado en el reconocimiento de poses, a través de la creación de umbrales de aceptación individualizados por paciente y pose. De esta forma, cada paciente tiene sus propios umbrales de aceptación, que además luego son únicos para cada pose. Así, por ejemplo, un paciente que tenga mayores problemas para realizar movimientos con el codo derecho, tendrá umbrales mayores en las poses que conlleven un movimiento en dicha articulación. Luego, a medida que el paciente fuese mejorando su movilidad articular, estos umbrales se irían reduciendo proporcionalmente, teniendo así una dificultad adaptativa automáticamente en base a la progresión del paciente. Mirándolo desde otro punto de vista, en la experimentación se ha visto cómo la evolución de estos umbrales a lo largo de una terapia de rehabilitación puede ser indicativa de los efectos de dicha terapia en la movilidad articular de los pacientes.

Por último, se ha desarrollado un modo de disponer de poses totalmente personalizadas a cada paciente. En lugar de haber un único catálogo de poses para todos los pacientes, ahora cada uno tiene su propio catálogo. Esto permite que los terapeutas puedan crear nuevas poses con ángulos ajustadas a las limitaciones de cada paciente, e incluir únicamente aquellas posturas que son recomendadas para el mismo dadas sus características clínicas, excluyendo las que no pueda alcanzar. También pueden realizarse pequeños cambios sobre las poses existentes, como cambiar la orientación de las palmas de las manos, algo que ha sido utilizado después en el campamento de terapia.

9.2. Líneas de Trabajo Futuro

La plataforma NaoTherapist es una herramienta que ofrece multitud de posibilidades en todos sus componentes. Este es un motivo por el cual este proyecto sigue tan activo tras tantos años, y a buen seguro seguirá así, incluso posiblemente en forma empresarial y no como proyecto de investigación universitario. Es por ello que, aunque en este trabajo se han estudiado algunas posibles mejoras, aún quedan algunas líneas de investigación a llevar a cabo.

En primer lugar, existe una línea de trabajo que ya fue iniciada por el autor de este documento, que consiste en el reconocimiento automático de actividades dinámicas. Actualmente, tal y como se ha explicado, la plataforma reconoce solamente poses estáticas adoptadas por los usuarios. Sin embargo, es muy interesante la posibilidad de reconocer movimientos completos. Esto permitiría poder reconocer movimientos basados en actividades cotidianas, como cepillarse los dientes, que beneficiarían en mayor medida al bienestar de los pacientes. El modo de desarrollar este reconocimiento ya ha sido planteado e implementado, a falta de ser probado y de realizar una experimentación formal que muestre los resultados de reconocimiento. Se plantea el uso de *Clustering* primero para agrupar la serie de poses que conforman el movimiento en diferentes grupos. Luego, a partir de las transiciones entre grupos diferentes se entrena un *HMM* (*Hidden Markov Model*), con el que luego poder reconocer el movimiento entrenado.

Otra posible línea de investigación, de cara a mejorar la monitorización de los usuarios o pacientes, podría ser la de incluir dos o más sensores de movimiento Kinect. Durante la utilización de la herramienta, en ocasiones, se detecta que se inferen algunas articulaciones. Aunque estas inferencias hechas por el software del sensor están muy logradas no llegan a ser siempre del todo acertadas. Por tanto, esto podría solucionarse incluyendo más de un sensor en la arquitectura, de forma que los diferentes puntos de vista interaccionen entre sí para formar un único modelo antropométrico mucho más ajustado al real del usuario detectado.

Por otro lado, existe un gran margen de mejora en lo relacionado con el sistema de adaptación al usuario. En primer lugar, podría realizarse un método de reconocimiento facial, mediante el cual el sistema reconociera a los pacientes debidamente situados frente a NAO e iniciara su correspondiente sesión. Así, se cargarían automáticamente todos los datos del usuario, adaptando las diferentes alternativas implementadas a sus necesidades. Además, también se podría estudiar la inclusión de un mayor número de parámetros configurables, con los que mejorar aún más el sistema de adaptación al usuario.

En cuanto a los tipos de actividades que puede desempeñar la plataforma y, por consiguiente, las posibles aplicaciones de NaoTherapist, también existe un amplio margen de actuación. Así, en un futuro podría investigarse la aplicación de esta plataforma robótica en otros grupos de pacientes distintos. Estos grupos de pacientes objetivo pueden variarse tanto en edad, pudiendo aplicarse en adultos o ancianos, como en enfermedad diagnosticada, alejándose de la rehabilitación motriz y centrándose en discapacidades cognitivas como el autismo o la demencia. Por supuesto, esto supondría una derivación del proyecto NaoTherapist por completo, diversificando el producto en diferentes segmentos de consumidores.

Bibliografía

[Alcázar et al., 2010] Alcázar, V., Madrid, I., Guzmán, C., Prior, D., Borrajo, D., Castillo, L., and Onaindía, E. (2010). Pelea: Planning, learning and execution architecture. In *In Proceedings of the 28th Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group (PlanSIG'10), Brescia-Italy*. (Cited on page 31)

[Bax et al., 2005] Bax, M., Goldstein, M., Rosenbaum, P., Leviton, A., Paneth, N., Dan, B., Jacobsson, B., and Damiano, D. (2005). Proposed definition and classification of cerebral palsy, april 2005. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 47(08):571–576. (Cited on page 5 und 150)

[BOE, 2015] BOE, A. E. (2015). Ley 24/2015, de 24 de julio, de patentes. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*. (Cited on page 114)

[Borggraefe et al., 2010] Borggraefe, I., Kiwull, L., Schaefer, J. S., Koerte, I., Blaschek, A., Meyer-Heim, A., and Heinen, F. (2010). Sustainability of motor performance after robotic-assisted treadmill therapy in children: an open, non-randomized baseline-treatment study. *Eur J Phys Rehabil Med*. (Cited on page 7 und 152)

[Burgar et al., 2000] Burgar, C. G., Lum, P. S., Shor, P. C., and Van der Loos, H. M. (2000). Development of robots for rehabilitation therapy: the palo alto va/stanford experience. *Journal of rehabilitation research and development*, 37(6):663–674. (Cited on page 14)

[Calderita et al., 2013] Calderita, L., Bustos, P., Suárez Mejías, C., Fernández, F., and Bandera, A. (2013). Therapist: Towards an autonomous socially interactive robot for motor and neurorehabilitation therapies for children. In *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2013 7th International Conference on*, pages 374–377. (Cited on page 2, 6 und 152)

- [Castelli, 2011] Castelli, E. (2011). Robotic movement therapy in cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 53(6):481–481. (Cited on page 5, 15 und 150)
- [Cenamor et al., 2016] Cenamor, I., de la Rosa, T., and Fernández, F. (2016). The ibacop planning system: Instance-based configured portfolios. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 56:657–691. (Cited on page 19)
- [Charles and Gordon, 2006] Charles, J. and Gordon, A. (2006). Development of hand-arm bimanual intensive training (habit) for improving bimanual coordination in children with hemiplegic cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 48(11):931–936. (Cited on page 3, 8, 150 und 153)
- [Choe et al., 2013] Choe, Y.-k., Jung, H.-T., Baird, J., and Grupen, R. A. (2013). Multidisciplinary stroke rehabilitation delivered by a humanoid robot: Interaction between speech and physical therapies. *Aphasiology*, 27(3):252–270. (Cited on page 14)
- [Chuang et al., 1993] Chuang, D. C.-C., Epstein, M. D., Yeh, M.-C., and Wei, F.-C. (1993). Functional restoration of elbow flexion in brachial plexus injuries: results in 167 patients (excluding obstetric brachial plexus injury). *The Journal of hand surgery*, 18(2):285–291. (Cited on page 4 und 150)
- [Consejo de la Unión Europea, 2016a] Consejo de la Unión Europea (2016a). Directiva (ue) 2016/680 del parlamento europeo y del consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos. *Directiva de la Unión Europea*. (Cited on page 110)
- [Consejo de la Unión Europea, 2016b] Consejo de la Unión Europea (2016b). Reglamento (ue) 2016/679 del parlamento europeo y del consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos. *Reglamento de la Unión Europea*. (Cited on page 110)
- [de Naciones Unidas (ONU), 2006] de Naciones Unidas (ONU), O. (2006). Convención sobre los derechos de las personas con discapacidad. *COMITÉ SOBRE LOS DERECHOS HUMANOS*. (Cited on page 130)
- [Dickinson et al., 2007] Dickinson, H. O., Parkinson, K. N., Ravens-Sieberer, U., Schirripa, G., Thyen, U., Arnaud, C., Beckung, E., Fauconnier, J., McManus, V., Michelsen, S. I., et al. (2007). Self-reported quality of life of 8–12-year-old children with cerebral palsy: a cross-

sectional european study. *The Lancet*, 369(9580):2171–2178. (Cited on page 5 und 151)

[Druzbicki et al., 2013] Druzbicki, M., Rusek, W., Snela, S., Dudek, J., Szczepanik, M., Zak, E., Durmala, J., Czernuszenko, A., Bonikowski, M., and Sobota, G. (2013). Functional effects of robotic-assisted locomotor treadmill therapy in children with cerebral palsy. *J Rehabil Med.* (Cited on page 7 und 152)

[Dubowsky et al., 2000] Dubowsky, S., Genot, F., Godding, S., Kozono, H., Skwersky, A., Yu, H., and Yu, L. S. (2000). Pamm-a robotic aid to the elderly for mobility assistance and monitoring: a “helping-hand” for the elderly. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA’00. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 570–576. IEEE. (Cited on page 14)

[Español, 2016] Español, U. C. (2016). *Convención sobre los Derechos del Niño*. FUNDA-CIÓN UNICEF-COMITÉ ESPAÑOL. (Cited on page 130)

[Fasola and Mataric, 2010] Fasola, J. and Mataric, M. (2010). Robot exercise instructor: A socially assistive robot system to monitor and encourage physical exercise for the elderly. In *RO-MAN, 2010 IEEE*, pages 416–421. (Cited on page 14)

[Feil-Seifer and Mataric, 2005] Feil-Seifer, D. and Mataric, M. J. (2005). Defining socially assistive robotics. In *Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on*, pages 465–468. IEEE. (Cited on page 1 und 13)

[Feil-Seifer and Mataric, 2011] Feil-Seifer, D. and Mataric, M. J. (2011). Socially assistive robotics. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 18(1):24–31. (Cited on page 1)

[Fikes and Nilsson, 1971] Fikes, R. E. and Nilsson, N. J. (1971). Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, 2(3):189—208. (Cited on page 19)

[Foix et al., 2011] Foix, S., Alenya, G., and Torras, C. (2011). Lock-in time-of-flight (tof) cameras: A survey. *Sensors Journal, IEEE*, 11(9):1917–1926. (Cited on page 20)

[Fong et al., 2003] Fong, T., Nourbakhsh, I., and Dautenhahn, K. (2003). A survey of socially interactive robots. *Robotics and autonomous systems*, 42(3):143–166. (Cited on page 14)

[Fox and Long, 2003] Fox, M. and Long, D. (2003). Pddl2. 1: An extension to pddl for expressing temporal planning domains. *Journal of artificial intelligence research.* (Cited on

page 19 und 34)

[Fridin et al., 2011] Fridin, M., Bar-Haim, S., and Belokopytov, M. (2011). Robotics agent coacher for cp motor function (rac cp fun). In *Robotics for Neurology and Rehabilitation, IROS International Conference on Intelligent Robots and Systems*. (Cited on page 14)

[Fuentetaja, 2011] Fuentetaja, R. (2011). The cbp planner. *The*, pages 21–24. (Cited on page 19)

[G. Estévez et al., 2017] G. Estévez, E., Díaz Portales, I., Pulido, J. C., Fuentetaja, R., and Fernández, F. (2017). Enhancing a robotic rehabilitation model forhand-arm bimanual intensive therapy. *ROBOT’2017 (Third Iberian Robotics Conference)*. (Cited on page 11 und 189)

[Garcia et al., 2011] Garcia, N., Sabater-Navarro, J. M., Gugliemeli, E., and Casals, A. (2011). Trends in rehabilitation robotics. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 49(10):1089–1091. (Cited on page 15)

[García Estévez, 2017] García Estévez, E. (2017). Plan de negocio de un robot terapeuta (naotherapist). *Trabajo de Fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid*. (Cited on page 127)

[Gerevini and Long, 2005] Gerevini, A. and Long, D. (2005). Plan constraints and preferences in pddl3. *The Language of the Fifth International Planning Competition. Tech. Rep. Technical Report, Department of Electronics for Automation, University of Brescia, Italy*, 75. (Cited on page 34)

[Ghallab et al., 2004] Ghallab, M., Nau, D., and Traverso, P. (2004). *Automated planning: theory & practice*. Elsevier. (Cited on page 17 und 19)

[Gilbert and Whitaker, 1991] Gilbert, A. and Whitaker, I. (1991). Obstetrical brachial plexus lesions. *Journal of Hand Surgery (British and European Volume)*, 16(5):489–491. (Cited on page 4 und 150)

[Gonzalez-Pacheco et al., 2013] Gonzalez-Pacheco, V., Malfaz, M., Fernandez, F., and Salichs, M. A. (2013). Teaching human poses interactively to a social robot. *Sensors*, 13(9):12406–12430. (Cited on page 21)

[González et al., 2017] González, J. C., González, J. C., and Fernández, F. (2017). A three-

layer planning architecture for the autonomous control of rehabilitation therapies based on social robots. *Cognitive Systems Research (CSR)*, 43:232–249. (Cited on page 2 und 25)

[Graf et al., 2010] Graf, J., Dittrich, F., and Wörn, H. (2010). High performance optical flow serves bayesian filtering for safe human-robot cooperation. In *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, pages 1–8. VDE. (Cited on page 22)

[Hall et al., 2009] Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., and Witten, I. H. (2009). The weka data mining software: an update. *ACM SIGKDD explorations newsletter*, 11(1):10–18. (Cited on page 21)

[Hoffmann et al., 2003] Hoffmann, J. et al. (2003). The metric-ff planning system: Translating "ignoring delete lists" to numeric state variables. *J. Artif. Intell. Res. (JAIR)*, 20:291–341. (Cited on page 18, 32 und 98)

[Kapandji et al., 1988] Kapandji, A., Kandel, M. J., and Kapandji, I. (1988). *Physiology of the Joints: Upper Limb: Volume 1*. Churchill Livingstone. (Cited on page 68)

[Kleim, 2008] Kleim, J.A., J. T. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of speech, language and hearing research*, 51(1):225–239. (Cited on page 8 und 153)

[Kovacs, 2012] Kovacs, D. L. (2012). A multi-agent extension of pddl3. 1. In *Proceedings of the 3rd Workshop on the International Planning Competition (IPC), ICAPS-2012, Atibaia, Brazil*, pages 19–27. (Cited on page 34)

[Krägeloh-Mann and Cans, 2009] Krägeloh-Mann, I. and Cans, C. (2009). Cerebral palsy update. *Brain and development*, 31(7):537–544. (Cited on page 5 und 150)

[Lacey and Dawson-Howe, 1998] Lacey, G. and Dawson-Howe, K. M. (1998). The application of robotics to a mobility aid for the elderly blind. *Robotics and Autonomous Systems*, 23(4):245–252. (Cited on page 14)

[Li, 2012] Li, Y. (2012). Hand gesture recognition using kinect. In *Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2012 IEEE 3rd International Conference on*, pages 196–199. IEEE. (Cited on page 29)

[Magill and Hall, 1990] Magill, R. and Hall, K. (1990). A review of the contextual interference

effect in motor skill acquisition. *Human movement science*, 9(3):241–289. (Cited on page 8 und 153)

[Manso et al., 2010] Manso, L., Bachiller, P., Bustos, P., Núñez, P., Cintas, R., and Calderita, L. (2010). Robocomp: a tool-based robotics framework. In *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, pages 251–262. Springer. (Cited on page 26)

[Matarić et al., 2007] Matarić, M. J., Eriksson, J., Feil-Seifer, D. J., and Winstein, C. J. (2007). Socially assistive robotics for post-stroke rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4(5). (Cited on page 7, 14, 15 und 152)

[McDermott et al., 1998] McDermott, D., Ghallab, M., Howe, A., Knoblock, C., Ram, A., Veloso, M., Weld, D., and Wilkins, D. (1998). Pddl - the planning domain definition language. *Technical report, CVC TR-98-003/DCS TR-1165, Yale Center for Computational Vision and Control*. (Cited on page 33)

[McMurrough et al., 2012] McMurrough, C., Ferdous, S., Papangelis, A., Boisselle, A., and Heracleia, F. M. (2012). A survey of assistive devices for cerebral palsy patients. In *Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '12*, pages 17:1–17:8, New York, NY, USA. ACM. (Cited on page 15)

[Meyer-Heim and van Hedel, 2013] Meyer-Heim, A. and van Hedel, H. J. (2013). Robot-assisted and computer-enhanced therapies for children with cerebral palsy: current state and clinical implementation. In *Seminars in pediatric neurology*, volume 20, pages 139–145. Elsevier. (Cited on page 15)

[Mitra and Acharya, 2007] Mitra, S. and Acharya, T. (2007). Gesture recognition: A survey. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 37(3):311–324. (Cited on page 20)

[Nalin et al., 2012] Nalin, M., Baroni, I., and Sanna, A. (2012). A Motivational Robot Companion for Children in Therapeutic Setting. In *IROS 2012*. (Cited on page 7 und 152)

[Nef et al., 2007] Nef, T., Mihelj, M., Kiefer, G., Perndl, C., Muller, R., and Riener, R. (2007). Armin-exoskeleton for arm therapy in stroke patients. In *Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on*, pages 68–74. IEEE. (Cited on page 14)

[Pednault, 1989] Pednault, E. P. (1989). Adl: Exploring the middle ground between strips

and the situation calculus. *Kr*, 89:324–332. (Cited on page 19)

[Perry et al., 2007] Perry, J. C., Rosen, J., and Burns, S. (2007). Upper-limb powered exoskeleton design. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 12(4):408–417. (Cited on page 15)

[Pulido et al., 2014] Pulido, J. C., González, J. C., González-Ferrer, A., García, J., Fernández, F., Bandera, A., Bustos, P., and Suárez, C. (2014). Goal-directed generation of exercise sets for upper-limb rehabilitation. In *Proceedings of Knowledge Engineering for Planning and Scheduling workshop (KEPS), ICAPS conference*, pages 38–45. (Cited on page 3 und 149)

[Pulido et al., 2016] Pulido, J. C., González, J. C., and Fernández, F. (2016). Naotherapist: Autonomous assistance of physical rehabilitation therapies with a social humanoid robot. In *International Workshop on Assistive & Rehabilitation Technology (IWARD)*, pages 15–16. (Cited on page 24)

[Pulido et al., 2017] Pulido, J. C., González, J. C., Suárez-Mejías, C., Bandera, A., Bustos, P., and Fernández, F. (2017). Evaluating the child–robot interaction of the naotherapist platform in pediatric rehabilitation. *International Journal of Social Robotics (JSR)*, 9:1–16. (Cited on page 2, 3 und 150)

[Puls et al., 2012] Puls, S., Graf, J., and Wörn, H. (2012). Cognitive robotics in industrial environments. *Human Machine Interaction–Getting Closer*, pages 213–234. (Cited on page 22)

[Reid, 2002] Reid, D. T. (2002). Benefits of a virtual play rehabilitation environment for children with cerebral palsy on perceptions of self-efficacy: a pilot study. *Developmental Neurorehabilitation*, 5(3):141–148. (Cited on page 5 und 151)

[Reiser et al., 2009] Reiser, U., Connette, C., Fischer, J., Kubacki, J., Bubeck, A., Weisshardt, F., Jacobs, T., Parlitz, C., Hagele, M., and Verl, A. (2009). Care-o-bot #x00ae; 3 - creating a product vision for service robot applications by integrating design and technology. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1992–1998. (Cited on page 14)

[Richter et al., 2011] Richter, S., Westphal, M., and Helmert, M. (2011). Lama 2008 and 2011. *The 2011 International Planning Competition*, page 50. (Cited on page 18)

[Rojo Castro, 2008] Rojo Castro, R. (2008). Kinesiología disciplina, kinesiología profesión: del hallazgo del eslabón perdido, a la propuesta de un nuevo paradigma. *Kinesiologia*, 27(2):66–77.

(Cited on page 20)

[Ros et al., 2011] Ros, R., Nalin, M., Wood, R., Baxter, P., Looije, R., Demir, Y., Belpaeme, T., Giusti, A., and Pozzi, C. (2011). Child-robot interaction in the wild: advice to the aspiring experimenter. In Bourlard, H., Huang, T. S., Vidal, E., Gatica-Perez, D., Morency, L.-P., and Sebe, N., editors, *ICMI*, pages 335–342. ACM. (Cited on page 7 und 152)

[Schmidt, 1988] Schmidt, R. (1988). *Motor Control and Learning*. Human kinetics, 5th edition. (Cited on page 8 und 153)

[Stanton et al., 2008] Stanton, C. M., Kahn, P. H., Severson, R. L., Ruckert, J. H., and Gill, B. T. (2008). Robotic animals might aid in the social development of children with autism. In *Human-Robot Interaction (HRI), 2008 3rd ACM/IEEE International Conference on*, pages 271–278. IEEE. (Cited on page 16)

[Suárez Mejías et al., 2013] Suárez Mejías, C., Echevarría, C., Nuñez, P., Manso, L., Bustos, P., Leal, S., and Parra, C. (2013). Ursus: A robotic assistant for training of children with motor impairments. In Pons, J. L., Torricelli, D., and Pajaro, M., editors, *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation*, volume 1 of *Biosystems & Biorobotics*, pages 249–253. Springer Berlin Heidelberg. (Cited on page 2, 14 und 16)

[Tapus et al., 2007] Tapus, A., Maja, M., Scassellatti, B., et al. (2007). The grand challenges in socially assistive robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1). (Cited on page 1)

[Turp et al., 2015] Turp, M., Pulido, J. C., González, J. C., and Fernández, F. (2015). Playing with robots: An interactive simon game. In *Proceedings of the 16th Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence (CAEPIA), RSIM workshop, (Albacete (Spain))*, pages 1085–1095. (Cited on page 39 und 156)

[Wada et al., 2005] Wada, K., Shibata, T., Saito, T., Sakamoto, K., and Tanie, K. (2005). Psychological and social effects of one year robot assisted activity on elderly people at a health service facility for the aged. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 2785–2790. (Cited on page 15)

[Winstein et al., 2003] Winstein, C. J., Miller, J. P., Blanton, S., Taub, E., Uswatte, G., Morris, D., Nichols, D., and Wolf, S. (2003). Methods for a multisite randomized trial to investigate the effect of constraint-induced movement therapy in improving upper extremity

function among adults recovering from a cerebrovascular stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 17(3):137–152. (Cited on page 16)

[Zhang, 2012] Zhang, Z. (2012). Microsoft kinect sensor and its effect. *IEEE multimedia*, 19(2):4–10. (Cited on page 27)

Anexo I

Work Summary

I.1. Introduction and Motivation

NaoTherapist is a project derived from the Therapist ¹ project of the National Research Plan (TIN2012-38079), in which several research groups from different Spanish universities worked together: the Integrated Systems Engineering Group of the University of Málaga, the Robotics Laboratory of the University of Extremadura, Multimedia & Multimodal Processing of the University of Jaén and the Planning and Learning Research Group of the Carlos III University of Madrid. In addition, this project was supported by an expert group of rehabilitation specialists and therapists from the University Hospital Virgen del Rocío (HUVR), in Seville. They offered clinical support during the development of the work, and enabled an initial evaluation of the robotic platform with real patients.

So then, after completing a new development phase of the Therapist project, the derived NaoTherapist is created, now owned just by the Carlos III University of Madrid. As relevant differences, a humanoid robot is used instead of a robot with the appearance of a bear, and the robotic platform is given greater autonomy, trying to avoid the therapists' participation during the session to improve the interaction with the user [Pulido et al., 2014].

¹<http://www.therapist.uma.es> - Ultimo acceso el 08/08/2017

Although this therapeutic tool had already been evaluated with real patients in a long-term evaluation at the University Hospital Virgen del Rocío in Seville [Pulido et al., 2017], the system was also invited to participate in an intensive therapy camp called HABIT (Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy), created at Columbia University [Charles and Gordon, 2006] and organized for the first time in Spain by the DACER Foundation ² and the European University. Due to the special characteristics of this type of therapy, which will be seen later, we can observe the need to adapt the current architecture to an intensive therapy environment, where there is a greater diversity of activities given the short time between one session and another (1 day) and a greater autonomous adaptation to the user due to the diversity of patients, with different degrees of affection. HABIT is performed in the form of a 20-day camp, with the participation of patients aged between 5 and 13 years, all of them with motor alterations in the upper extremities produced by Obstetric Brachial Palsy or Cerebral Palsy.

Obstetric Brachial Palsy (OBP) is a “weakness or loss of movement of the upper extremities produced when the set of nerves around the shoulder are damaged during childbirth” [Gilbert and Whitaker, 1991]. This group of nerves is called the Brachial Plexus. This complication of childbirth has been reduced over the years thanks to advances in medicine. Despite this, 1.5 of every 1000 children present this type of injury at birth and require physical rehabilitation. However, the Brachial Plexus can also suffer damages in traffic accidents or infections, although in any case rehabilitation is required to recover the mobility of the limbs affected, either on a partially or totally way [Chuang et al., 1993].

Cerebral Palsy (CP), at the other side, is the term that frames the “group of non-progressive conditions usually related to the inability to fully control motor functions” [Bax et al., 2005] [Krägeloh-Mann and Cans, 2009]. It does not belong to the group of Rare Diseases, since 60 % of children with motor deficiency are classified under cerebral palsy, being actually quite common in the population. The causes of these injuries in children are usually caused by complications during pregnancy, childbirth or the postnatal period; though, just like OBP can also occur from some type of infection or accident. In total, 3 per 1000 births present this symptomatology and it is estimated that about 650,000 European families are looking after a person with cerebral palsy [Castelli, 2011]. These motor disorders are directly related to the limbs of the individual, both superior and inferior, limiting the patient’s joint movements.

²<http://www.dacer.org/fd-campamanto> - Ultimo acceso el 09/08/2017

These two conditions compromise the patient's autonomy in tasks of daily life such as dressing, feeding or moving [Dickinson et al., 2007]. In addition, by the moment no cure is known, but the improvement of patients should be sought through the completion of rehabilitation therapies. Thus, a well-designed and executed therapy allows to improve different abilities, like walking or grasping objects, reducing the stiffness of the muscles and preventing possible malformations [Reid, 2002]. Hence, it is needed a motivating element for patients, who must undergo long and tedious rehabilitation therapies, as well as support medium for therapists to facilitate the execution of therapies and follow-up of patients' evolution.

Anyone who has undergone intensive physical rehabilitation knows the frustration, boredom and discomfort that recurring exercises bring over days, weeks or even months. For this reason, for young children and their families, rehabilitation often means a traumatic and emotional period. Physiotherapists and doctors that deals with these children must be highly qualified in the art of motivation and distraction of children, but this motivation entails a great cost in time and resources. In addition, in spite of their efforts, they do not obtain good results in all the sessions. Regarding this, as discussed above, the quality of therapy and patient commitment become key factors in the success of a rehabilitation therapy.

Trying to solve this, the NaoTherapist project proposes the use of new technologies in these rehabilitation sessions. Specifically, it is committed to the development of a technological platform, which integrates a humanoid robot named "NAO", an ideal candidate for patients to collaborate and be motivated during the rehabilitation. However, rehabilitation requires more than a child's attention, but also continuous compliance with the therapist's instructions and sufficient motivation for the child to persevere. Thus, the platform must be properly developed to fulfill three new roles, according to the needs of a therapeutic assistant: the motivator, the demonstrator and the instructor.



Figura I.1: NAO Robot.

Typical users of this tool are children, who require more attention from therapists to avoid distractions and thus make the most of the time available for each session. At the same time, therapies are often long and consist only of repeating certain movements. This is so humdrum that it can easily lead to a loss of patient's interest, impacting on the results of therapy. To overcome this, therapists have to invest a lot of time in the sessions on the child's motivation, although the desired effect is not always achieved, which does not reach the desired goals [Calderita et al., 2013]. All this gains a greater importance, if possible, in intensive care, since patients attend therapy sessions day after day for a certain period of time, providing them with motivating and innovative elements. In this way, NaoTherapist fulfills the **motivational role** as an innovative element in rehabilitation therapies. Following this, NAO should be able to provide words of encouragement, which can be achieved, in part, with promises of rewards for well done work, such as dances, music and stories. Another interesting option is to include personalized phrases of encouragement with the patient's name, and based on their own interests. Then, in order not to lose their motivation and attention, a great variety of games or rehabilitation exercises should be included too.

On the other hand, we have the two roles that play a more practical role within therapy sessions. Firstly, the **demonstrator role**. In this role, the robot introduces and describes each exercise of the session, before performing the movement in front of the child. When it is over, the patient is invited to perform this exercise together. The last one is the **instructor role**, guiding the child through a series of activities in game form. The platform closely follows the patient's movements with the aid of a 3D camera (Kinect v2), providing technical feedback on the correction of the movement and reacting to the different milestones that are achieved with gestures and words of encouragement. With this "kinematic" analysis performed on patients, in addition, clinical reports on the status and evolution of patients can be generated. These two roles represent another great benefit for therapists, since they free themselves from a certain workload, not having to develop the whole session and dedicating solely their efforts to the design and supervision of therapy.

As can be seen, the benefits of robotics to this type of rehabilitation activity are quite important. In summary, it is possible to download the work of the therapist with the active participation of the robots in the rehabilitation sessions. In addition, a tool can be provided to greatly facilitate the monitoring of therapy sessions [Matarić et al., 2007]. With this, a whole line of research is initiated around the study of the benefits of using this type of techniques [Družbicki et al., 2013] [Ros et al., 2011] [Borggraefe et al., 2010], even new models of behavior with the aim of improving the patient-robot interaction are proposed [Nalin et al., 2012].

Therefore, this work is underpinned by the idea that patients will be more committed to rehabilitation therapies led by social robots, something much needed in intensive rehabilitation therapies. This implies a huge research on the design of new types of therapies or activities based on the use of robots, specifically the NaoTherapist platform, which will help patient recovery and reduce social-economic costs. It also takes into account the needs of the therapists themselves, trying to make their daily work easier with a support tool, both in the development of therapies and in patient monitoring.

I.2. Objectives and Development

In order to understand the objectives of this work, it is advisable to first describe the organization and objectives of the HABIT camp in Spain, the main reason for this work, and how a typical rehabilitation session is carried out with the robot inside it, according to the coordinator of the camp. The aim of HABIT is to help children to improve the skills and coordination of both arms in daily activities [Charles and Gordon, 2006]. Its success lies in the application of intensive daily therapy, based on some key concepts such as repetition of movements with variability of exercises [Magill and Hall, 1990], progressive increase of complexity, motivation [Kleim, 2008], and positive feedback [Schmidt, 1988]. These concepts represent, in short, the needs of the infant patients in their rehabilitation process. Thus, during the course of the camp, the children must perform a multitude of therapeutic activities, hidden under a relaxed atmosphere of game. These activities, in turn, must respect the individualized treatment, being personalized according to the needs of each patient, due to the high heterogeneity of the patients who usually participate in it. In this way, the coordinator of the camp establishes general therapeutic objectives based on the HABIT method, which each therapist must then adapt to each child's needs and clinical diagnosis.

In the first edition of this camp in Spain, held in July 2017, it was decided to include daily special sessions with the NaoTherapist system. The purpose of incorporating this platform was to increase the type of activities that the children could carry out during the course of the camp, with a fixed number of individual sessions with the robot. Each therapist must first design each therapy session with the robot, adapting the exercises and poses to perform to the needs of his patient. Then, after observing the course of the session and the evolution of the patient, the therapist can update the following sessions already designed for therapy or generate new ones.

So on, the final purpose of this project is to adapt the NaoTherapist system and architecture to the needs of an intensive therapy, such as the one developed in the HABIT camps. Considering that the sessions are on consecutive days, it is very important to design a robot-patient interaction been able to maintain the children' motivation throughout all the camp. On the other hand, it is also intended to free the therapist from a greater workload, trying to provide a better monitoring of the articular angles with which he is more familiar and more information about the evolution of the patient.

The following is a summary of the problems addressed in this paper and the proposed solution for each one with the objective of solving them:

1. *Problem 1: Therapists do not have a tool with which they can monitor the patient's movements in real time, that is, with which to see their physical limitations without resorting to physical contact.*

- Proposal 1: Developing a monitoring tool that shows in real time the patient's joint angles when performing a particular pose or movement. To this end, it is intended to generate a new model of joint bio-mechanics within the NaoTherapist architecture that is more familiar with the knowledge of therapists. Then, it is wanted to offer a graphical interface with which patients can be monitored, while generating new poses for the catalog available in the sessions to be designed by the therapists.

2. *Problem 2: For an intensive therapy it is necessary to have a very rich interaction between robot and patient, in order to avoid a loss of motivation of patients over time.*

- Proposal 2: Designing, with the help of professional therapists, new types of activities, which will then be integrated into the automatic scheduler of the existing NaoTherapist architecture, thus increasing the variability of the exercises. This integration should allow several types of exercises to be performed in the same therapy session without hampering interaction with the patient, so that a general execution flow and a specific one for each type of exercise will be worked on. On the other hand, this general flow will also be modified, trying to obtain a reward system adapted to the performance of the patient during the exercise and the possibility of hiding the therapy with the robot in a different environment.

3. *Problem 3: Formerly, the NaoTherapist architecture does not have a system of adaptation to the user with which to easily customize both the complexity of the exercises and the interaction with the robot to their clinical needs.*

- Proposal 3: Working in a new user adaptation system, in which the recognition of well-posed poses is more or less rigorous in function of the physical limitations of the own patient, impacting this in the complexity of the session. In addition, in this adaptation system, each user will have customized poses and sessions according to their clinical needs. In this way, it is not needed to design poses, sessions or speeches that must be adjusted to all the patients as a whole, but it will be possible to maintain the heterogeneity of the characteristics of each one.

Thus, in this update, it is first included an improvement in the process of capturing anthropometric data of the patients who perform the session. With the new development of this component, we aim to achieve a better quality of the information received by the sensor with the integration of the second version of the Kinect in the architecture, thereby giving greater robustness and precision to the capture of patient data . To achieve this goal, we have worked on an update of the *WinKinectComp* interface, being adapted to the new data provided by the Kinect v2 sensor.

In addition, after analyzing the anthropometric model of angles initially presented by the platform, it was concluded that it was not entirely intuitive for therapists and doctors participating in rehabilitation therapies, since they followed a few calculations and nomenclatures strange to his knowledge of the matter. Therefore, a new *Vision* module has been developed, which implements a new representation of the patient's postural state more familiar with the expert knowledge of rehabilitation therapies. At the same time as this improvement analysis was carried out, many of the therapists asked about the possibility of observing the calculated angles in real time, which is why we also worked on a new graphic interface that includes a view of the joint angles of the observed user.

All these important changes in the *Vision* component, in turn, caused that others had to be made related to the storage of the poses in a catalog and the comparison of those poses with the one carried out by the patient during the therapy, because the new model of angles drastically changed the measurements and the data organization compared to the previous model.

Then, more focused on the platform adaptation to an intensive care environment, is the development related to the rehabilitation sessions automated planning. Initially, NaoTherapist was designed to guide the patients in a unique type of activity called “mirroring”, in which the patients must imitate the poses that are running the robot and are corrected if they do it incorrectly. Later, thanks to the work of Misra Turp, a game similar to the Electronic Simon was also designed, but with poses instead of colors [Turp et al., 2015], where the robot teaches a set of poses, which increases with each turn, and then the patient must imitate them in the same order, remembering the poses shown by the robot.

However, this Simon game could not be integrated in the same session next to the exercise of the mirror, instead it had to be executed separately when being in a separate domain. Thus, prior to the interviews with the therapists, the need arose to develop a new planning domain for the therapy sessions, which allowed several different types of activities to be carried out in the same session. Therefore, this has been another of the lines of development in which this project has been worked on.

Added to this, during meetings with professionals who were part of the intensive care camp, it was discovered the need to implement a greater variety of different activities in the platform. This necessity is due to the characteristics of the camp mainly, since the same sessions would be repeated on consecutive days, so that the monotony, and the consequent loss of motivation of the children, is avoided with the realization of different types of exercises throughout the therapy.

One of the requests they made was to incorporate a mirror-like exercise in which the robot dictated voice commands that the child had to carry out correctly, so that the child’s attention was worked out, a more cognitive part, without neglecting physical rehabilitation. Thus, the *Nao Says* game was designed, in which the robot NAO tries by voice commands that the children touch a specific part of its own body, with either of the hands or with a specific one.

In addition to the Simon game, which seemed very interesting to include in the therapies and which would henceforth be called *Memory* to avoid confusion, another new game to incorporate by request of the therapists was the *Inverse Memory*. The only difference from the first is that the patient must execute the poses previously shown by the robot in the reverse order, assuming a greater cognitive challenge for the child.

The latest novelty incorporated into the NaoTherapist architecture in this work is the user adaptation system. According to the coordinator of the camp, another factor of great importance in rehabilitation therapies lies in the adaptation of the therapy to the clinical needs of each user, due to the great heterogeneity of patients who require these therapies, taking into account both the affection shown as their severity degree. In therapies developed with NaoTherapist, this user adaptation can be understood in two ways: one more related to the design of the sessions themselves or the choice of exercises and poses recommended for each specific child; and another concerning the difficulty of the session, masked in this case under the decision of the system to mark a pose as correct or not.

I.3. Conclusions and Future Work

With all the work done, it was sought to address a set of problems arising from the possibility of using the NaoTherapist platform in a different rehabilitation environment. A series of needs were detected, which later were translated into new platform functionalities. Thus, with the development carried out in the work, it has been possible to reach the main objective of the work, which consisted in the elaboration of a new social and interactive robotic platform adapted to the characteristics of an intensive bimanual therapy, thus extending the field of action of the NaoTherapist project.

The first component of the updated and improved NaoTherapist for the intensive care camp was the *Vision*. With its development, it has managed to solve one of the problems presented by the previous version, which based the calculation of joint angles in an anthropometric model unknown to therapists. Thanks to the help of several therapists, a new anthropometric model could be designed with a nomenclature much closer to its knowledge and calculations based on human bio-mechanics. This has made it possible to offer a tool of support to the therapists of greater confidence, since it uses familiar knowledge to them.

As a consequence of this new anthropometric model, it has also been necessary to modify the method of comparison between pose requested by the tool and pose maintained by the patient, since now the data to be compared were different. In this new comparison is created a new object *Comparison*, which gives a more complete information about the similarity between the two poses passed by parameters.

On the other hand, therapists also often demand real-time monitoring of joint angles. The necessary calculations were already made to create the anthropometric model of the patient, so it was only necessary to develop an interface that presents the data properly and perform periodic updates almost in real time. As seen in the evaluation of the camp, this new functionality is very useful for therapists and doctors, as it allows them to be able to make diagnoses about physical disabilities in a much faster and easier way.

Also related to this interface, a new mode has been included to include new poses to the available catalog and then design the rehabilitation sessions. Thus, therapists can create at any time new poses that are not included by default in the tool, thus favoring the adaptability of the platform to the different disabilities that patients can present.

Another part of the platform that has been redesigned in this work is the automated planning of therapy sessions. Previously, there were only two types of exercises or activities to do with the robot NAO: *Mirror* and *Memory*. In addition, these two games could not be integrated in the same session, but the system had to be restarted to switch between the two.

Clearly, this turned out to be a serious problem in therapy sessions for two reasons. First, there was a significant loss of quality in the interaction between robot and patient when changing exercise. Secondly, the limited variety of exercises facilitated the possibility of patient boredom, progressively losing their motivation and attention, two keys of the use of NaoTherapist in these rehabilitation therapies. This was further accentuated, if appropriate, in intensive therapies, with sessions on many consecutive days. Therefore, trying to solve this, it has been designed a new planning domain.

This domain is now able to integrate different types of exercises in the same session, first implementing a general flow with which to control the order of execution of each exercise, in addition to including the corresponding introduction before it and the reward after its execution. This has made it possible to considerably improve both the autonomy of the robot and the interaction of the robot with patients, making rehabilitation sessions much more dynamic and entertaining for patients. Experimentally, in addition, it is shown how this integration of the exercises in the same domain does not alter the planning times at all, so it does not affect the reactions of the robot to unplanned and unforeseen events, such as a bad pose by the patient.

Then, the new types of activities included enrich the platform enormously, adding a multitude of new possibilities for the design of therapy sessions. In this way, it is tried to avoid boredom of patients and the monotony of rehabilitation with the robot. And not only that, but allow to work new physical-cognitive skills during therapy, such as body awareness and proprioception. All these new use cases were properly tested in the laboratory, as they were developed. Thus, it was ensured its correct operation in the face of intensive care camp, where it was then tested with real patients.

Another important part of the work lies in the attempt to achieve an adaptation to the user of the NaoTherapist tool. With the development of this adaptation system, a great advance has been achieved, since it is now possible to personalize much more all the rehabilitation therapy, being able to adapt it to the unique characteristics of each patient.

Firstly, this user adaptation has been developed into the design of therapy sessions, being in this sense related to the planning of such sessions. In the planning domain several alternatives have been included to be chosen by the therapists in the design of the rehabilitation sessions of their patients. The now configurable aspects are many and varied: exercises and poses to be performed, maximum number of attempts, type of correction to be performed after each attempt, etc... All this translates into the possibility of creating therapies much more adapted to different degrees and types of disability of patients, which can be a great benefit in their rehabilitation process.

On other way, we have also worked on the adaptability of the difficulty of the exercises to each user. This has been done in the recognition of poses, through the creation of individualized acceptance thresholds per patient and pose. Each patient has its own acceptance thresholds, which are then unique for each pose. Thus, for example, a patient who has greater problems with movements with the right elbow, will have higher thresholds in the poses that carry a movement in that joint. Then, as the patient improved his joint mobility, these thresholds would be reduced proportionally, thus having an automated adaptive difficulty based on the progression of the patient. Looking at it from another point of view, in the experimentation has been seen how the evolution of these thresholds along a rehabilitation therapy can be indicative of the effects of such therapy on patients' joint mobility.

Finally, a functionality has been developed to have totally personalized poses for each patient. Instead of having a single catalog of poses for all patients, now each has its own catalog. This allows therapists to create new poses with angles adjusted to the limitations of each patient, and include only those postures that are recommended for the same given their clinical characteristics, excluding those that can not reach. Small changes can also be made to existing poses, such as changing the orientation of the palms, something that has been used later in the therapy camp.

In short, it can be verified that the NaoTherapist platform is a tool that offers a multitude of possibilities in all its components. This is a reason why this project remains so active after so many years, and will surely continue this way, possibly even in a business form and not as a university research project. That is why, although in this work have studied some possible improvements, there are still some lines of research to carry out in the future.

First of all, there is a line of work that was already initiated by the author of this document, which consists in the automatic recognition of dynamic activities. Currently, as explained, the platform recognizes only static postures taken by users. However, the possibility of recognizing complete movements is very interesting. This would allow the system to recognize movements based on daily activities, like brushing the teeth, that would benefit more to the well-being of the patients. The way to develop this recognition has already been raised and implemented, in the absence of being tested and of carrying out a formal experimentation that shows the recognition results. It is proposed to use *Clustering* first to group the series of poses that make up the movement into different groups. Then, from the transitions between different groups, a *HMM (Hidden Markov Model)* is trained, with which then recognize the trained movement.

Another possible line of research, in order to improve the monitoring of users or patients, could be to include two or more Kinect motion sensors. During the use of the tool, it is sometimes detected that some joints are inferred. Although these inferences made by sensor software are very successful they do not always become quite successful. Therefore, this could be solved by including more than one sensor in the architecture, so that the different points of view interact with each other to form a single anthropometric model much more adjusted to the real position of the detected user.

There is another great margin of improvement in relation to the system of adaptation to the user. In the first place, a facial recognition method could be performed, whereby the system recognizes patients properly positioned in front of NAO and begins their corresponding session. This would automatically load all the user data, adapting the different alternatives implemented to their needs. In addition, the inclusion of a greater number of configurable parameters could also be studied, with which to further improve the system of adaptation to the user.

In terms of the types of activities that the platform can carry out and, consequently, the possible applications of NaoTherapist, there is also a wide scope for action. Thus, in the future, the application of this robotic platform in other groups of patients could be investigated. These groups of target patients can be varied in age, can be applied in adults or elderly, as in diagnosed disease, moving away from motor rehabilitation and focusing on cognitive disabilities such as autism or dementia. Of course, this would be a derivation of the NaoTherapist project, diversifying the product into different segments of consumers.

Anexo II

Catálogo de las Poses

Incorporadas a la Plataforma

NaoTherapist

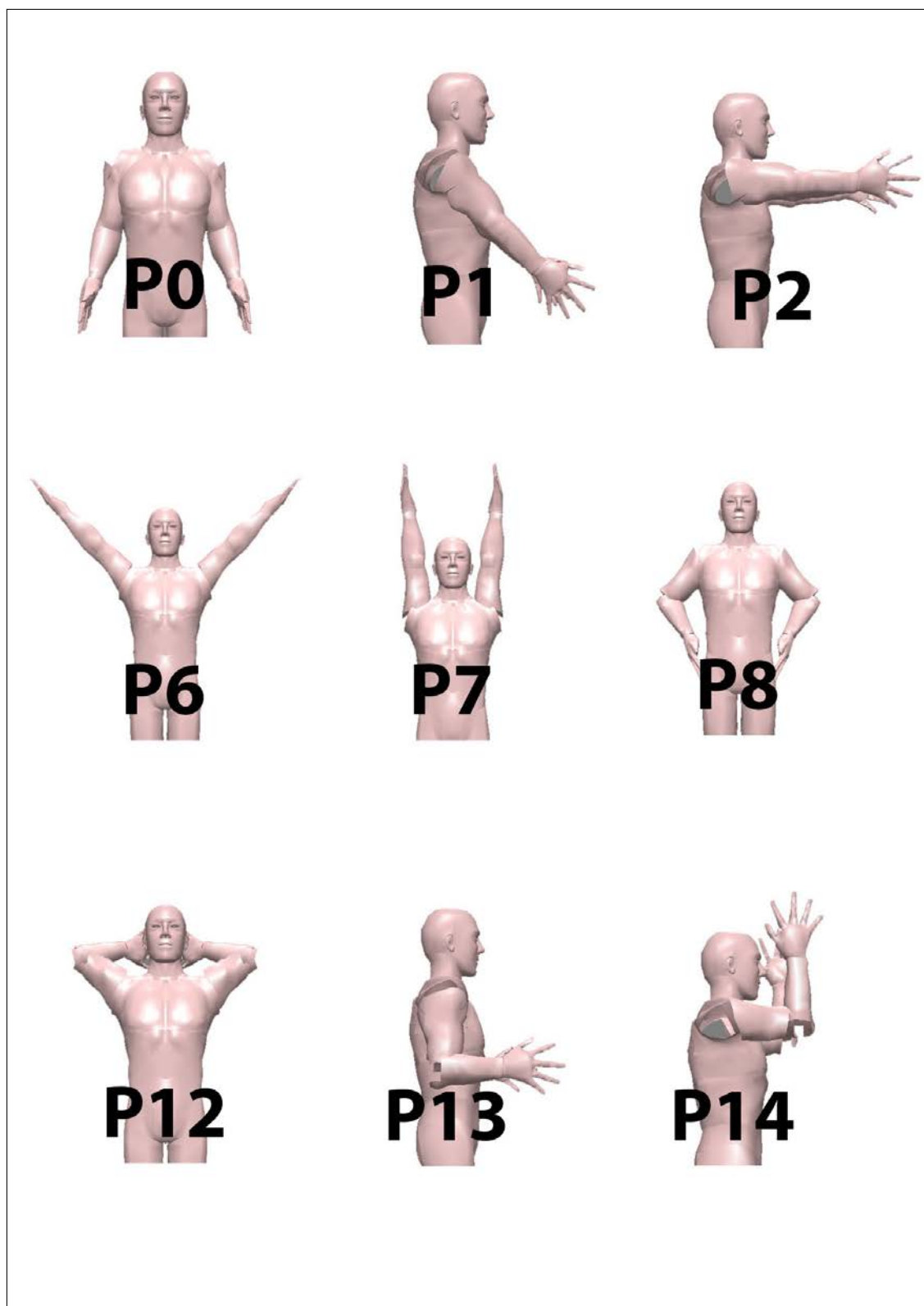


Figura II.1: Catálogo de Poses (parte 1).

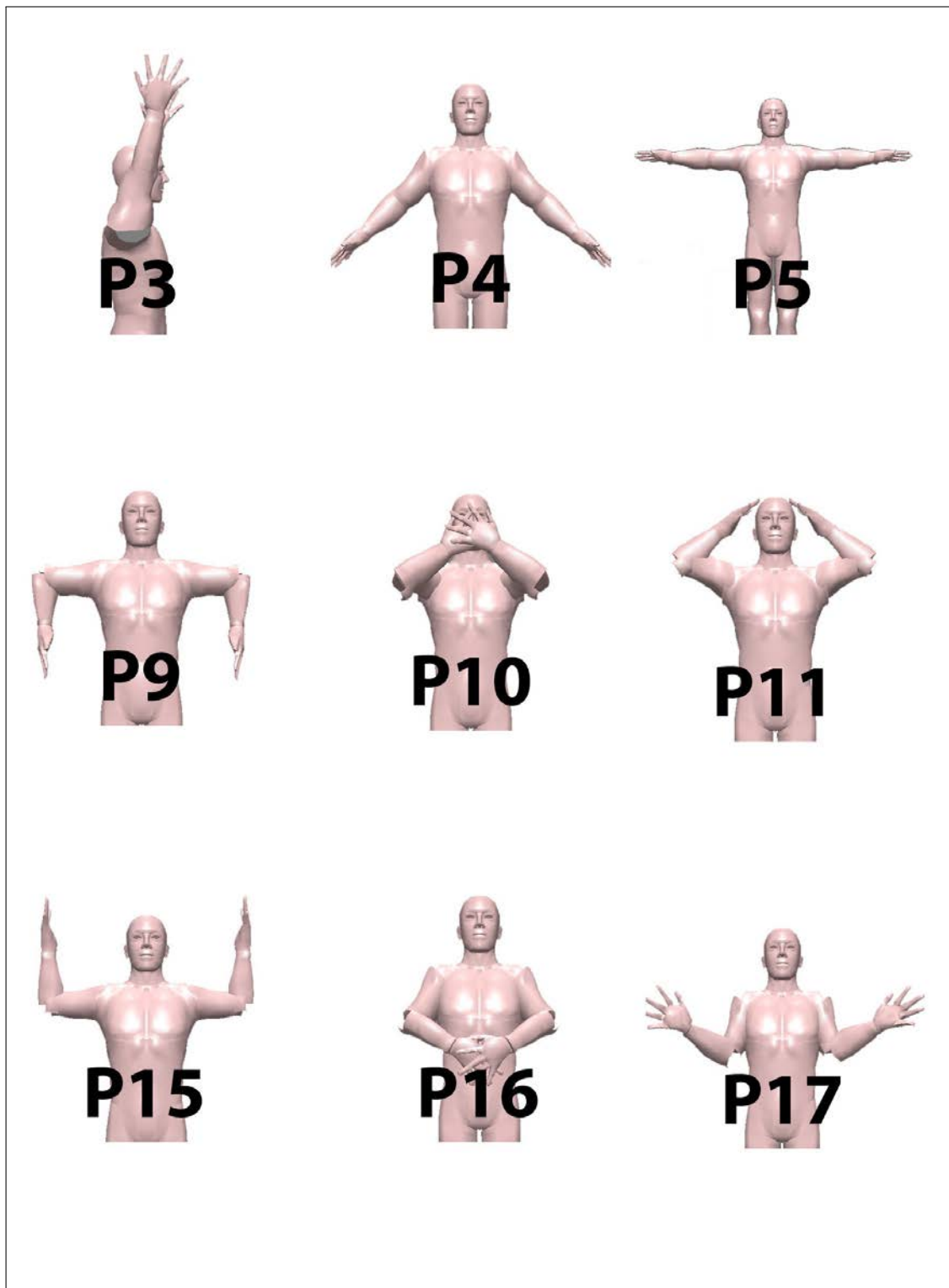


Figura II.2: Catálogo de Poses (parte 2).

Anexo III

Datos sobre la Progresión de la Movilidad Articular de los Pacientes participantes en el Campamento de Terapia Intensiva

III.1. Progresión de Diego (pt01)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1234				1	0	0,1160						
l2	0,2300	2	2	0,2683				6	0	0,2095	2	0	0,1851
l3	0,1404	1	0	0,1320	2	0	0,1167	1	0	0,1097	1	0	0,1031
l4	0,1354	1	0	0,1273	6	3	0,1604				1	0	0,1508
l5	0,1153	9	0	0,0847	1	0	0,0796	6	0	0,0604	20	9	0,1207
l6	0,0698												
l7	0,1196	2	0	0,1057	1	0	0,0994	3	0	0,0934	6	1	0,0788
l8	0,1410				2	0	0,1410				6	1	0,1523
l9	0,1541												
l10	0,2300				1	0	0,2162	4	1	0,2063			
l11	0,1184	6	2	0,1078	1	0	0,1013	1	0	0,0952			
l12	0,1883	8	3	0,2096	4	2	0,2160				2	1	0,2160
l13	0,1297				2	0	0,1297						
l14	0,1290							3	0	0,1213			
l15	0,1125										1	0	0,1058
l16	0,1547	2	1	0,1671	7	1	0,1499	1	0	0,1409			
l17	0,1376							2	1	0,1486	4	0	0,1313
r1	0,1333												
r2	0,1673	2	2	0,1952	1	0	0,1853	4	0	0,1433	1	0	0,1347
r3	0,1463	1	0	0,1375	2	0	0,1215	1	0	0,1142	1	0	0,1073
r4	0,1280				4	2	0,1493				2	0	0,1319
r5	0,1309	8	1	0,0976				7	0	0,0683	21	8	0,1099
r6	0,1338	4	2	0,1561	6	0	0,1076	2	0	0,0950	2	1	0,1026
r7	0,1429	3	1	0,1363	2	0	0,1204	6	1	0,1149	5	0	0,0954
r8	0,1644										6	3	0,2071
r9	0,1626												
r10	0,2300				1	0	0,2162	4	1	0,2063			
r11	0,2300	6	1	0,1795	2	1	0,2094						
r12	0,1800	9	3	0,2004	4	2	0,2066				2	1	0,2231
r13	0,1386												
r14	0,1512				2	1	0,1633	3	1	0,1658			
r15	0,1421										1	0	0,1336
r16	0,1560	2	0	0,1560	7	3	0,1633	1	0	0,1535			
r17	0,1439				2	1	0,1554	2	0	0,1554	4	1	0,1483

Tabla III.1: Evolución del Paciente pt01 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión %Progresión	
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral			
2	0	0,1636	2	0	0,1446	7	1	0,1296	6	1	0,1162	0,1160	0,0074	6,00%
2	1	0,1113	3	1	0,1202				9	2	0,1147	0,1162	0,1138	49,48%
1	0	0,1418	1	0	0,1333	1		0,1253	3	1	0,1272	0,1147	0,0257	18,32%
10	1	0,0957	8	1	0,0713	5	0	0,0602	8	3	0,0757	0,1272	0,0082	6,06%
												0,0757	0,0396	34,35%
												0,0698	0,0000	0,00%
7	3	0,0824	8	1	0,0740	4	3	0,0932	4	2	0,1007	0,1007	0,0189	15,80%
5	0	0,1432	3	0	0,1189	5	0	0,1118				0,1118	0,0292	20,71%
												0,1541	0,0000	0,00%
						5	1	0,1850	1	0	0,1739	0,1739	0,0561	24,39%
						2	1	0,1028	5	1	0,0744	0,0744	0,0440	37,16%
1	0	0,2030	2	0	0,2030	2	0	0,1794				0,1794	0,0089	4,74%
												0,1297	0,0000	0,00%
												0,1213	0,0077	5,97%
1	0	0,0995	1	0	0,0935	2	0	0,0826				0,0826	0,0299	26,55%
									2	0	0,1324	0,1324	0,0223	14,41%
6	3	0,1653	3	0	0,1373							0,1373	0,0003	0,19%
1	0	0,1266	1	0	0,1190	9	2	0,1153	1	0	0,1253	0,1253	0,0080	6,00%
3	1	0,1159	9	3	0,1291				6	1	0,1035	0,1035	0,0638	38,14%
2	0	0,1161	2	0	0,1030	1	0	0,0968				0,1291	0,0172	11,78%
11	2	0,0885	10	1	0,0602	4	0	0,0602	3	1	0,0983	0,0983	0,0297	23,20%
1	0	0,0964	2	1	0,1041	3	2	0,1142	8	1	0,0649	0,0649	0,0660	50,42%
6	0	0,0843	6	1	0,0756	5	0	0,0711	2	1	0,1233	0,1233	0,0105	7,85%
5	2	0,2271	3	0	0,1887	5	3	0,2069	4	2	0,0768	0,0768	0,0661	46,26%
												0,2069	-0,0425	-25,85%
												0,1626	0,0000	0,00%
						5	1	0,2094	1	0	0,1968	0,1968	0,0332	14,42%
									4	0	0,1739	0,1739	0,0561	24,39%
1	0	0,2097	2	1	0,2265	2	0	0,2129				0,2129	-0,0329	-18,28%
												0,1386	0,0000	0,00%
												0,1658	-0,0146	-9,66%
1	0	0,1256	1	0	0,1181	2	0	0,1043				0,1043	0,0378	26,57%
									2	0	0,1356	0,1356	0,0204	13,05%
6	2	0,1730	3	0	0,1436							0,1436	0,0003	0,19%
Media Lado Izquierdo													0,0242	15,54%
Media Lado Derecho													0,0188	12,45%
Media TOTAL													0,0215	13,90%

Tabla III.2: Evolución del Paciente pt01 (parte 2)

III.2. Progresión de Lucas (pt02)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1103	6	0	0,0917							1	0	0,0862
l2	0,1409				5	1	0,1264						
l3	0,1352	1	0	0,1271	2	1	0,1373						
l4	0,1267	10	1	0,1069	2	0	0,0945				2	0	0,1021
l5	0,1109	1	0	0,1042	2	0	0,1042	6	0	0,0813	8	0	0,0635
l6	0,1424												
l7	0,2067				6	1	0,1972						
l8	0,1307	2	0	0,1307				5	0	0,1086	2	0	0,1086
l9	0,1309	4	1	0,1249				1	0	0,1174	4	2	0,1369
l10	0,2300				3	1	0,2335				1	0	0,2195
l11	0,1614	2	1	0,1743	3	0	0,1638			0,0000	6	1	0,1563
l12	0,1761				10	5	0,2149	1	0	0,2020			
l13	0,1525	1	0	0,1434	1	0	0,1348	10	4	0,1619	9	2	0,1669
l14	0,2260												
l15	0,1874												
l16	0,1401	3	0	0,1164	7	1	0,0981						
l17	0,1424	2	1	0,1538									
r1	0,1718	6	0	0,1341	2	2	0,1564				1	0	0,1470
r2	0,1668				6	3	0,2101						
r3	0,2391												
r4	0,1640	12	1	0,1221	4	1	0,1166	6	1	0,0982	2	2	0,1146
r5	0,1727				2	1	0,1865				8	2	0,1689
r6	0,2100												
r7	0,2300				4	2	0,2484						
r8	0,1758	2	2	0,2051				5	2	0,2248	2	1	0,2428
r9	0,1584	4	2	0,1633				1	0	0,1535	4	2	0,1791
r10	0,2300				3	1	0,2335				1	0	0,2195
r11	0,1801				2	1	0,1945	3	2	0,2133	6	3	0,2375
r12	0,2300				10	6	0,2988	1	0	0,2809			
r13	0,1560	1	0	0,1466	2	0	0,1295	10	4	0,1557	9	3	0,1733
r14	0,2226												
r15	0,1874												
r16	0,1464	4	0	0,1293	6	1	0,1089						
r17	0,1564	1	0	0,1470									

Tabla III.3: Evolución del Paciente pt02 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión %Progresión	
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral		Progresión	%Progresión
2	0	0,0762	1	0	0,0716	2	0	0,0673				0,0673	0,0430	38,96%
			1	0	0,1188	1	0	0,1117	4	0	0,0872	0,0872	0,0537	38,11%
												0,1373	-0,0021	-1,55%
1	0	0,0960	8	1	0,0917	7	0	0,0761	4	0	0,0715	0,0715	0,0552	43,57%
10	0	0,0606	6	1	0,0620	6	2	0,0610	1	0	0,0573	0,0573	0,0536	48,33%
			1	0	0,1339	2	0	0,1339	1	0	0,1259	0,1259	0,0165	11,61%
												0,1972	0,0095	4,60%
1	0	0,1021	1	0	0,0960	2	1	0,1036				0,1036	0,0271	20,71%
2	0	0,1210										0,1210	0,0099	7,58%
1	0	0,2063										0,2063	0,0237	10,30%
5	0	0,1298	2	0	0,1147	3	0	0,1078	5	1	0,1028	0,1028	0,0586	36,31%
												0,2020	-0,0259	-14,71%
6	1	0,1497	8	2	0,1450	8	5	0,1882				0,1882	-0,0357	-23,41%
												0,2260	---	---
												0,1874	---	---
									2	1	0,1059	0,1059	0,0342	24,41%
			3	0	0,1446	5	2	0,1687	1	0	0,1586	0,1586	-0,0162	-11,36%
2	0	0,1299	1	0	0,1221	2	0	0,1079	2	1	0,1165	0,1165	0,0553	32,18%
			1	0	0,1975	1	0	0,1875	4	1	0,1667	0,1667	0,0001	0,08%
												0,2391	---	---
1	0	0,1077	8	4	0,1293	7	3	0,1352	4	1	0,1373	0,1373	0,0267	16,28%
19	2	0,1750	7	2	0,1696	8	2	0,1522	1	0	0,1431	0,1431	0,0296	17,16%
									1	0	0,1974	0,1974	0,0126	6,00%
												0,2484	-0,0184	-8,00%
1	0	0,2282	1	0	0,2145	2	0	0,2145				0,2145	-0,0387	-22,01%
2	0	0,1583										0,1583	0,0001	0,07%
1	0	0,2063										0,2063	0,0237	10,29%
5	2	0,2301	2	0	0,2033	3	1	0,2064	4	1	0,1970	0,1970	-0,0169	-9,38%
												0,2809	-0,0509	-22,12%
7	1	0,1461	8	3	0,1626	8	0	0,1436				0,1436	0,0124	7,95%
												0,2226	---	---
												0,1874	---	---
									2	1	0,1176	0,1176	0,0288	19,67%
			3	1	0,1493	5	4	0,2030	1	0	0,1908	0,1908	-0,0344	-22,01%
												Media Lado Izquierdo	0,0203	15,56%
												Media Lado Derecho	0,0021	2,78%
												Media TOTAL	0,0116	8,95%

Tabla III.4: Evolución del Paciente pt02 (parte 2)

III.3. Progresión de Jorge (pt03)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1523												
l2	0,1360	2	1	0,1469	4	2	0,1610						
l3	0,1388												
l4	0,1493	1	0	0,1403	1	0	0,1319	1	0	0,1240	1	0	0,1166
l5	0,1261	1	0	0,1185				5	0	0,0984	4	0	0,0768
l6	0,1449	7	2	0,1404				1	0	0,1320	1	0	0,1241
l7	0,1280	5	0	0,1063	1	0	0,0999	3	1	0,1014	3	2	0,1111
l8	0,1537				1	0	0,1445	3	2	0,1686	1	0	0,1585
l9	0,1565												
l10	0,2039	2	1	0,2202				1	0	0,2070	1	0	0,1946
l11	0,1416												
l12	0,1709	6	0	0,1179	7	3	0,1396	11	1	0,1332	8	0	0,1040
l13	0,1716	2	2	0,2001	9	4	0,2260	6	0	0,1997	6	2	0,1934
l14	0,2299	2	1	0,2483	12	3	0,2406	1	0	0,2262	1	0	0,2126
l15	0,1515	1	0	0,1424	4	3	0,1794	1	0	0,1686	3	1	0,1821
l16	0,1333												
l17	0,1489	4	0	0,1316				4	1	0,1180	5	0	0,1109
r1	0,1352							1	0	0,1271	1	0	0,1195
r2	0,1513				2	0	0,1337	1	0	0,1257	3	1	0,1358
r3	0,1319												
r4	0,1530	4	2	0,1677	4	1	0,1599	4	0	0,1413			
r5	0,1329	1	0	0,1249									
r6	0,1477	5	0	0,1227	7	3	0,1284						
r7	0,1264	5	1	0,1134	1	0	0,1066	1	0	0,1002	1	0	0,0942
r8	0,1509	7	2	0,1655	2	0	0,1463						
r9	0,1280							1	0	0,1203	2	1	0,1299
r10	0,2010	2	1	0,2171	12	5	0,2955	5	1	0,2612	4	0	0,1918
r11	0,1562				2	0	0,1562						
r12	0,1681	6	0	0,1159				12	4	0,1231	7	1	0,1023
r13	0,1609				2	0	0,1609	6	2	0,1659	6	1	0,1487
r14	0,2300												
r15	0,1418	1	0	0,1333									
r16	0,1311	1	0	0,1232	7	1	0,1251	6	1	0,1193	6	2	0,1229
r17	0,1493	1	0	0,1403									

Tabla III.5: Evolución del Paciente pt03 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión	%Progresión
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral			
			2	0	0,1610				4	0	0,1257	0,1523	---	---
												0,1257	0,0103	7,59%
												0,1388	---	---
1	0	0,1096				1	0	0,1030	2	0	0,0910	0,0910	0,0583	39,05%
2	1	0,0829	4	2	0,0967	1	0	0,0909				0,0909	0,0352	27,92%
1	0	0,1167	11	4	0,1319	7	0	0,0968	9	2	0,0828	0,0828	0,0621	42,85%
2	0	0,0981				1	0	0,0922				0,0922	0,0358	27,96%
												0,1585	-0,0048	-3,11%
												0,1565	---	---
			7	3	0,2304				4	0	0,1799	0,1799	0,0240	11,76%
									3	0	0,1176	0,1176	0,0240	16,95%
5	1	0,1056	2	0	0,1056	10	1	0,0837				0,0837	0,0872	51,02%
10	4	0,2326	9	1	0,2361	3	0	0,2219	4	0	0,1961	0,1961	-0,0245	-14,27%
6	0	0,1659				5	0	0,1377	1	0	0,1294	0,1294	0,1005	43,70%
1	0	0,1712	1	0	0,1609	1	0	0,1512				0,1512	0,0003	0,17%
									2	1	0,1440	0,1440	-0,0107	-8,03%
9	4	0,1178	7	1	0,1124	5	2	0,1090	4	2	0,1271	0,1271	0,0218	14,64%
4 0 0,1060									1	0	0,1123	0,1123	0,0229	16,92%
												0,1060	0,0453	29,92%
												0,1319	---	---
									2	0	0,1328	0,1328	0,0202	13,19%
									4	0	0,1069	0,1069	0,0260	19,58%
									9	2	0,1031	0,1031	0,0446	30,18%
												0,0659	0,0605	47,85%
									4	1	0,1106	0,1106	0,0403	26,68%
									4	0	0,1183	0,1183	0,0097	7,58%
									1	0	0,1343	0,1343	0,0667	33,17%
3 0 0,0782 2 0 0,1293 2 0 0,1299 6 0 0,1593			9 2 0,1369 10 4 0,1544 3 1 0,0794 9 1 0,1312 7 2 0,1339			5 0 0,1133 3 0 0,0659 2 0 0,1159 2 0 0,1183 5 1 0,1429			2	0	0,1380	0,1380	0,0182	11,66%
												0,1105	0,0576	34,27%
												0,1606	0,0003	0,19%
												0,2600	-0,0300	-13,04%
												0,1333	0,0085	6,00%
									2	0	0,1134	0,1134	0,0177	13,53%
												0,1319	0,0174	11,67%
									Media Lado Izquierdo				0,0300	18,44%
									Media Lado Derecho				0,0266	18,10%
									Media TOTAL				0,0282	18,25%

Tabla III.6: Evolución del Paciente pt03 (parte 2)

III.4. Progresión de Santiago (pt04)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1784	12	3	0,1649	13	3	0,1348						
l2	0,1379	5	1	0,1237	5	2	0,1198	12	1	0,0950	3	2	0,1108
l3	0,1619	6	2	0,1669	7	3	0,1858				2	1	0,2007
l4	0,1309												
l5	0,1254												
l6	0,1433	6	2	0,1477	6	1	0,1324	4	3	0,1668	12	4	0,2133
l7	0,1676							11	4	0,1780	3	1	0,1922
l8	0,2300												
l9	0,1497												
l10	0,2213	2	1	0,239	1	0	0,2247						
l11	0,1354	3	2	0,1484	2	0	0,1311	4	2	0,1529			
l12	0,2157							9	3	0,2554	7	1	0,2291
l13	0,1857	2	0	0,1857	1	0	0,1746						
l14	0,1604							6	3	0,1899	4	1	0,1812
l15	0,1755										7	1	0,1674
l16	0,1945												
l17	0,1368										9	4	0,1861
r1	0,1662	11	4	0,1766	12	3	0,1848						
r2	0,1414	5	1	0,1268	5	2	0,1229	13	3	0,1209	4	1	0,1306
r3	0,1254	6	2	0,1292	7	1	0,1232				3	2	0,1437
r4	0,1186												
r5	0,1263												
r6	0,1503	6	3	0,1673	6	1	0,1501	4	2	0,1751	10	4	0,2238
r7	0,1219							6	1	0,1027	2	1	0,1109
r8	0,1916												
r9	0,1476												
r10	0,2300	2	1	0,2484	1	0	0,2335						
r11	0,2300	3	1	0,2335	2	0	0,2065	2	2	0,2406	1	0	0,2262
r12	0,2151							6	3	0,2547	1	0	0,2394
r13	0,1735	2	1	0,1874	1	0	0,1762						
r14	0,1491							14	8	0,2593	6	1	0,2474
r15	0,2300										11	5	0,2488
r16	0,2174							1	0	0,2044			
r17	0,1434										9	5	0,2108

Tabla III.7: Evolución del Paciente pt04 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión	%Progresión
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral			
9	2	0,2069	7	1	0,1975	10	3	0,2488	4	2	0,1312	0,1348	0,0436	24,44%
												0,1312	0,0067	4,86%
												0,2488	-0,0869	-53,68%
												0,1230	0,0079	6,04%
6	2	0,2338	9	3	0,2768	14	2	0,2682	1	0	0,2521	0,1254	---	---
												0,2521	-0,1088	-75,93%
												0,2277	-0,0601	-35,84%
												0,2195	0,0105	4,57%
1	0	0,1807	4	2	0,2108	2	0	0,2195	3	0	0,1753	0,1497	---	---
												0,22466	-0,0034	-1,52%
												0,1753	-0,0399	-29,48%
												0,2995	-0,0838	-38,85%
4	3	0,1926	3	2	0,2110	2	0	0,2111	3	0	0,1753	0,1746	0,0111	6,00%
												0,2995	-0,0838	-38,85%
												0,1746	0,0111	6,00%
												0,1812	-0,0208	-12,99%
14	4	0,2754	10	3	0,2617	10	4	0,2995	2	1	0,2101	0,2536	-0,0781	-44,51%
												0,2101	-0,0156	-8,02%
												0,2381	-0,1013	-74,05%
												0,2381	-0,1013	-74,05%
3	1	0,1700	11	4	0,2313	5	2	0,2536	2	1	0,2101	0,2381	-0,1013	-74,05%
												0,2101	-0,0156	-8,02%
												0,2381	-0,1013	-74,05%
												0,2381	-0,1013	-74,05%
8	4	0,2533	1	0	0,2381	5	2	0,2536	2	1	0,2101	0,2381	-0,1013	-74,05%
												0,2101	-0,0156	-8,02%
												0,2381	-0,1013	-74,05%
												0,2381	-0,1013	-74,05%
5	2	0,2027	2	0	0,2027	3	1	0,2057	1	0	0,1934	0,1934	-0,0272	-16,34%
												0,1475	-0,0061	-4,31%
												0,2076	-0,0822	-65,59%
												0,1186	0,0000	0,00%
15	6	0,2015	7	2	0,2076	2	1	0,1591	2	0	0,1186	0,1591	-0,0328	-25,97%
												0,2785	-0,1282	-85,31%
												0,1761	-0,0542	-44,46%
												0,2304	-0,0388	-20,25%
2	2	0,1294	4	3	0,1631	2	1	0,1761	1	0	0,2785	0,2344	-0,0868	-58,78%
												0,2335	-0,0035	-1,52%
												0,1765	0,0535	23,25%
												0,2524	-0,0373	-17,34%
1	0	0,2126	1	0	0,1998	12	4	0,2397	2	0	0,1765	0,2397	-0,0662	-38,13%
												0,2055	-0,0564	-37,82%
												0,2816	-0,0516	-22,45%
												0,2076	0,0098	4,51%
10	5	0,2813	8	1	0,2524	3	1	0,2816	3	1	0,2076	0,2108	-0,0674	-47,00%
												0,2076	0,0098	4,51%
												0,2108	-0,0674	-47,00%
												0,2108	-0,0674	-47,00%
									Media Lado Izquierdo			-0,0346	-21,93%	
									Media Lado Derecho			-0,0397	-26,64%	
									Media TOTAL			-0,0373	-24,58%	

Tabla III.8: Evolución del Paciente pt04 (parte 2)

III.5. Progresión de Mario (pt05)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1581	1	0	0,1486	1	0	0,1397				9	1	0,1253
l2	0,1462	5	0	0,1073	5	0	0,0788	10	1	0,0707			
l3	0,1612							1	0	0,1515	1	0	0,1424
l4	0,1494										5	0	0,1241
l5	0,1647	2	0	0,1455	2	0	0,1286	6	2	0,1325			
l6	0,1723							1	0	0,1620	4	1	0,1546
l7	0,2300	3	0	0,1910	4	2	0,1968				2	0	0,1968
l8	0,2300	2	1	0,2484	2	1	0,2683						
l9	0,3261	2	0	0,3052	1	0	0,2869				2	1	0,2976
l10	0,2300	2	0	0,2300	1	0	0,2126	5	2	0,2371	4	1	0,2263
l11	0,2300												
l12	0,1707							2	0	0,1797	1	0	0,1689
l13	0,1636	1	0	0,1538	1	0	0,1446	1	0	0,1359			
l14	0,2300							2	0	0,2032	2	1	0,2195
l15	0,2300	3	1	0,2335	2	0	0,2063	1	0	0,1939	3	1	0,2094
l16	0,2027	1	0	0,1905	2	1	0,2057	2	1	0,2222	1	0	0,2089
l17	0,1338	1	0	0,1258	1	0	0,1183	10	7	0,1905	4	1	0,1818
r1	0,1499	1	0	0,1409	1	0	0,1324				9	3	0,1386
r2	0,1339	5	0	0,0982	5	0	0,0721	8	4	0,0815			
r3	0,1290							1	0	0,1213	1	0	0,1140
r4	0,1421										5	0	0,1181
r5	0,1512	2	0	0,1336	2	0	0,1181	6	1	0,1126			
r6	0,1621							1	0	0,1524	4	0	0,1347
r7	0,1318	3	0	0,1095	4	2	0,1129				2	1	0,1219
r8	0,1820	2	1	0,1966	2	0	0,1966						
r9	0,2404	2	0	0,2404	1	0	0,2260				2	0	0,2260
r10	0,2300	2	1	0,2484	1	0	0,2335	5	2	0,2561	4	0	0,2263
r11	0,2861												
r12	0,1764							2	1	0,1905	1	0	0,1791
r13	0,2260	1	0	0,2124	1	0	0,1997				1	0	0,1877
r14	0,2300							2	0	0,2032	2	0	0,2032
r15	0,2300	3	1	0,2335	2	0	0,2063	1	0	0,1939	3	1	0,2094
r16	0,2188	1	0	0,2057	2	0	0,2057	2	1	0,2222	1	0	0,2089
r17	0,2028	1	0	0,1906	1	0	0,1792	10	4	0,2292	4	1	0,2326

Tabla III.9: Evolución del Paciente pt05 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión	%Progresión
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral			
2	1	0,1353										0,1353	0,0228	14,42%
2	0	0,0665	14	3	0,0670	2	1	0,0727	6	3	0,0809	0,0809	0,0653	44,64%
1	0	0,1339	2	1	0,1446	11	3	0,1490	2	0	0,1490	0,1490	0,0122	7,57%
			3	2	0,1447	1	0	0,1360				0,1360	0,0134	8,97%
8	2	0,1207	5	0	0,0886	8	2	0,0846	2	0	0,0987	0,0987	0,0660	40,07%
5	2	0,1596				1	0	0,1498	3	1	0,1521	0,1521	0,0202	11,72%
			2	0	0,1968	3	2	0,1998				0,1998	0,0303	13,15%
2	1	0,2898							2	1	0,2980	0,2980	-0,0680	-29,57%
			2	0	0,2628							0,2628	0,0633	19,40%
												0,2263	0,0037	1,63%
1	0	0,2126				4	0	0,1687	3	1	0,1713	0,1713	0,0587	25,52%
3	1	0,1715	5	2	0,1970	1	0	0,1852				0,1852	-0,0145	-8,48%
2	0	0,1201				2	2	0,1401				0,1401	0,0235	14,39%
1	0	0,2063										0,2063	0,0237	10,30%
4	0	0,1635	2	1	0,1766	7	2	0,1820				0,1820	0,0480	20,88%
1	0	0,1964							3	1	0,1846	0,1846	0,0181	8,93%
2	0	1,6060	7	2	0,1734	3	1	0,1764				0,1764	-0,0426	-31,84%
1	0	0,1303							1	0	0,1225	0,1225	0,0274	18,29%
2	0	0,0720	15	4	0,0866	1	0	0,0814	6	1	0,0777	0,0777	0,0562	41,97%
2	1	0,1231	1	0	0,1157	12	4	0,1371	2	1	0,1481	0,1481	-0,0191	-14,81%
			3	2	0,1295	1	0	0,1217	2	0	0,1075	0,1075	0,0346	24,32%
8	0	0,0879	7	2	0,0800	8	2	0,0824	2	2	0,0961	0,0961	0,0551	36,43%
5	2	0,1388				1	0	0,1305	3	0	0,1227	0,1227	0,0394	24,31%
			2	1	0,1317	3	1	0,1238				0,1238	0,0080	6,07%
2	0	0,1966							2	0	0,1966	0,1966	-0,0146	-8,02%
			2	0	0,1997							0,1997	0,0407	16,95%
												0,2263	0,0037	1,63%
1	0	0,2689				4	0	0,2099	2	1	0,2267	0,2267	0,0594	20,76%
3	1	0,1934	5	1	0,1735	1	0	0,1631				0,1631	0,0133	7,54%
						2	0	0,1764				0,1764	0,0496	21,95%
2	0	0,1796										0,1796	0,0504	21,91%
4	0	0,1635				7	2	0,1685				0,1685	0,0615	26,74%
1	0	0,1964							2	1	0,2121	0,2121	0,0067	3,06%
2	0	0,2055	8	1	0,2087	3	1	0,2119				0,2119	-0,0091	-4,48%
												Media Lado Izquierdo	0,0202	10,10%
												Media Lado Derecho	0,0273	14,15%
												Media TOTAL	0,0237	12,25%

Tabla III.10: Evolución del Paciente pt05 (parte 2)

III.6. Progresión de Marta (pt06)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1539				2	1	0,1662	1	0	0,1562			
l2	0,1900	2	1	0,2052	3	0	0,1929	2	0	0,1704	4	0	0,1704
l3	0,1641	11	3	0,1614									
l4	0,1249												
l5	0,1218	6	1	0,1026	5	1	0,0919	5	0	0,0763	15	3	0,0705
l6	0,1561	2	2	0,1821	6	1	0,1536	7	0	0,1276	3	1	0,1295
l7	0,1438	2	1	0,1553	5	3	0,1838	4	0	0,1624	6	2	0,1574
l8	0,1986										1	0	0,1867
l9	0,1701												
l10	0,1579												
l11	0,1337	6	2	0,1379									
l12	0,2169	2	0	0,2169	9	1	0,1829	7	0	0,1342			
l13	0,1753				1	0	0,1648	1	0	0,1549			
l14	0,1670	2	1	0,1804	1	0	0,1696	1	0	0,1594			
l15	0,1711	6	3	0,2026							4	1	0,2056
l16	0,1412	3	1	0,1525	1	0	0,1434	1	0	0,1348			
l17	0,1578	2	0	0,1394	1	0	0,1311	1	0	0,1232			
r1	0,1854				2	1	0,2002	1	0	0,1882			
r2	0,1900	2	0	0,1900	3	0	0,1679	2	0	0,1483	4	1	0,1602
r3	0,1143	11	4	0,1214									
r4	0,1533												
r5	0,1297	6	1	0,1094	5	1	0,0980	5	1	0,0879	10	5	0,1072
r6	0,1923	2	1	0,2077	6	1	0,1751	7	1	0,1571	1	0	0,1477
r7	0,1309	2	0	0,1309	5	2	0,1435	4	1	0,1369	11	2	0,1247
r8	0,1572										1	0	0,1478
r9	0,1980												
r10	0,1640												
r11	0,1471	6	2	0,1517									
r12	0,2077	2	1	0,2243	9	2	0,2044	7	0	0,1500	3	1	0,1523
r13	0,1942				1	0	0,1825	1	0	0,1716			
r14	0,2055	2	1	0,2219	1	0	0,2086	1	0	0,1961			
r15	0,1473	6	2	0,1616							3	1	0,1745
r16	0,1579	3	1	0,1603	1	0	0,1507	1	0	0,1417			
r17	0,1679	2	0	0,1483	1	0	0,1394	1	0	0,1311			

Tabla III.11: Evolución del Paciente pt06 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión %Progresión	
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral			
5	0	0,1251	8	3	0,1309	1	0	0,1230	5	4	0,1549	0,1562	-0,0023	-1,51%
												0,1549	0,0351	18,47%
												0,1614	0,0027	1,65%
									2	1	0,1349	0,1349	-0,0100	-8,01%
8	2	0,0727	8	2	0,0703	2	0	0,0624	3	0	0,0568	0,0568	0,0650	53,39%
3	0	0,1217	4	1	0,1235	5	1	0,1179	1	0	0,1108	0,1108	0,0453	29,00%
8	2	0,1348	12	2	0,1307	6	4	0,1572	3	0	0,1478	0,1478	-0,0040	-2,78%
												0,1867	0,0119	6,00%
												0,1701	---	---
												0,1579	---	---
2	0	0,1218	2	0	0,1145				6	4	0,1463	0,1463	-0,0126	-9,42%
3	1	0,1362	3	1	0,1383	12	5	0,1663				0,1663	0,0506	23,33%
												0,1549	0,0204	11,63%
						9	4	0,1887				0,1887	-0,0217	-12,99%
3	0	0,1933	3	0	0,1817	4	0	0,1510				0,1510	0,0201	11,75%
									2	0	0,1456	0,1456	-0,0044	-3,12%
												0,1232	0,0346	21,93%
8	2	0,1289	11	3	0,1120	3	0	0,0930	1	0	0,1769	0,1769	0,0085	4,58%
									5	2	0,0901	0,0901	0,0999	52,58%
												0,1214	-0,0071	-6,25%
									2	1	0,1656	0,1656	-0,0123	-8,02%
1	0	0,1008	1	0	0,0948	1	0	0,0891	2	0	0,0741	0,0741	0,0556	42,89%
2	1	0,1595	3	1	0,1620	4	1	0,1546	1	0	0,1670	0,1670	0,0253	13,17%
7	0	0,0916	10	5	0,1118	5	1	0,1135	3	1	0,1152	0,1152	0,0157	11,99%
												0,1478	0,0094	6,00%
												0,1980	---	---
												0,1640	---	---
7	1	0,1361	8	2	0,1319				5	2	0,1447	0,1447	0,0024	1,65%
2	0	0,1346	3	1	0,1366	11	4	0,1544				0,1544	0,0533	25,66%
												0,1716	0,0227	11,66%
						9	4	0,2321				0,2321	-0,0266	-12,94%
5	2	0,1914	4	1	0,1826	6	0	0,1447				0,1447	0,0026	1,74%
									2	0	0,1417	0,1417	0,0162	10,29%
												0,1311	0,0368	21,94%
												Media Lado Izquierdo	0,0154	9,29%
												Media Lado Derecho	0,0202	11,64%
												Media TOTAL	0,0178	10,54%

Tabla III.12: Evolución del Paciente pt06 (parte 2)

III.7. Progresión de Andrea (pt07)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1531	9	3	0,1571	6	0	0,1084						
l2	0,1399	1	0	0,1357	1	0	0,1276				1	0	0,1199
l3	0,1361	4	1	0,1332	3	0	0,1106						
l4	0,1307	1	0	0,1268	1	0	0,1192						
l5	0,1375							10	2	0,1089	5	1	0,0977
l6	0,2081	4	1	0,2036	3	0	0,1691	2	2	0,1972			
l7	0,1411	2	1	0,1467	1	0	0,1379	2	2	0,1608	2	0	0,1421
l8	0,1444	7	2	0,1426	6	1	0,1202						
l9	0,1494										5	2	0,1447
l10	0,2300										5	0	0,1687
l11	0,1348	2	1	0,1402	1	0	0,1318	3	0	0,1239	2	0	0,1239
l12	0,1711	3	1	0,1726	3	1	0,1752				4	1	0,1892
l13	0,1696							2	1	0,1832	2	0	0,1619
l14	0,1426										5	1	0,1448
l15	0,1812	1	0	0,1758	1	0	0,1653	6	3	0,2082	1	0	0,1957
l16	0,1284												
l17	0,1283							1	0	0,1206	2	0	0,1206
r1	0,1342	14	4	0,1390	10	2	0,0990						
r2	0,1391												
r3	0,1208										2	0	0,1068
r4	0,1277												
r5	0,1150	4	1	0,1126	4	1	0,1074						
r6	0,2237	4	1	0,2188	3	0	0,1818	3	2	0,1993	3	2	0,2185
r7	0,1275							4	1	0,1216	1	0	0,1143
r8	0,1366	7	3	0,1403	5	0	0,1030						
r9	0,1426												
r10	0,2300							2	1	0,2484			
r11	0,1662	2	1	0,1728	1	0	0,1624	6	1	0,1550	10	2	0,1247
r12	0,2068							1	0	0,1944	2	1	0,2100
r13	0,1692												
r14	0,1513							6	2	0,1659	2	0	0,1466
r15	0,2084	1	0	0,2021	1	0	0,1900	1	0	0,1786	6	0	0,1394
r16	0,1331												
r17	0,1311							3	2	0,1437	8	3	0,1599

Tabla III.13: Evolución del Paciente pt07 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión %Progresión										
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral												
3	0	0,1040	5	2	0,1140	6	2	0,1250				0,1084	0,0447	29,21%									
									8	2	0,1026	0,1026	0,0373	26,66%									
									1	0	0,1175	0,1175	0,0186	13,67%									
									2	0	0,1053	0,1053	0,0254	19,45%									
3	1	0,2002	1	0	0,1882	1	0	0,1769				0,0977	0,0398	28,97%									
									1	0	0,1663	0,1663	0,0418	20,09%									
									2	0	0,1421	4	0	0,1110	8	3	0,1313	4	0	0,1025	0,1025	0,0386	27,38%
																				0,1202	0,0242	16,74%	
12	3	0,1219	1	0	0,1146	1	0	0,1077				0,1447	0,0047	3,13%									
																				0,1687	0,0613	26,64%	
																				0,0894	0,0454	33,68%	
																				0,1499	0,0212	12,39%	
3	1	0,1920	1	0	0,1805	2	0	0,1499				0,1619	0,0077	4,55%									
																				0,1361	0,0065	4,55%	
																				0,1413	0,0399	22,03%	
																				0,1135	0,0149	11,64%	
1	0	0,1361	5	0	0,1552	7	2	0,1599				0,0899	0,0384	29,96%									
9	1	0,1868	1	0	0,0956	1	0	0,0899															
6	1	0,1017	2	0	0,1502	3	1	0,1622				0,0931	0,0411	30,66%									
6	2	0,1107	1	0	0,1041	1	0	0,0979				0,1267	0,0124	8,91%									
3	0	0,1074	5	0	0,0788	10	3	0,0933				0,1068	0,0140	11,60%									
8	3	0,1688	2	0	0,1931	2	0	0,1706				0,1128	0,0149	11,67%									
7	1	0,2229	3	1	0,2263	5	1	0,2297				0,0979	0,0171	14,91%									
2	2	0,1455	1	0	0,1368	1	0	0,1286				0,1604	0,0633	28,32%									
3	0	0,1974	2	1	0,2132	2	0	0,1884				0,0775	0,0500	39,22%									
1	0	0,1590	3	1	0,2263	5	1	0,2297				0,1030	0,0336	24,58%									
4	0	0,1295	2	1	0,2132	2	0	0,1884				0,1688	-0,0262	-18,37%									
1	0	0,1310	2	0	0,1328	2	0	0,1173				0,2030	0,0270	11,76%									
1	0	0,1503	2	0	0,1328	2	0	0,1173				0,1306	0,0356	21,42%									
									Media Lado Izquierdo			0,0300	19,46%										
									Media Lado Derecho			0,0259	16,26%										
									Media TOTAL			0,0280	17,77%										

Tabla III.14: Evolución del Paciente pt07 (parte 2)

III.8. Progresión de Hector (pt08)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1673	7	2	0,1652	3	0	0,1553	1	0	0,1460	3	1	0,1482
l2	0,1349	8	3	0,1428	2	0	0,1261	2	2	0,1471	2	0	0,1471
l3	0,1641	2	0	0,1544	1	0	0,1451	1	0	0,1364	2	0	0,1364
l4	0,1503				1	0	0,1413	1	0	0,1328	1	0	0,1248
l5	0,1453	1	0	0,1409	2	1	0,1522	1	0	0,1431	1	0	0,1345
l6	0,1662	2	1	0,1728	1	0	0,1624	2	1	0,1754			
l7	0,1827	6	4	0,2137	1	0	0,2009				1	0	0,1888
l8	0,1721	9	7	0,2178				1	0	0,2047			
l9	0,1731				3	2	0,1757						
l10	0,2300				1	0	0,2126				1	0	0,2032
l11	0,1474	5	3	0,1658				1	0	0,1559			
l12	0,1838												
l13	0,1533	2	1	0,1594	2	0	0,1594				3	32	0,1619
l14	0,2427												
l15	0,1738	2	1	0,1808									
l16	0,1447												
l17	0,1929	1	0	0,1871	1	0	0,1759	1	0	0,1653			
r1	0,1639	9	3	0,1683	3	1	0,1709	1	0	0,1606	3	2	0,1761
r2	0,1426	8	4	0,1569	1	0	0,1475	2	0	0,1475	2	1	0,1593
r3	0,1527	1	0	0,1481	2	0	0,1308	1	0	0,1230	2	1	0,1328
r4	0,1526							1	0	0,1434	1	0	0,1348
r5	0,1395	4	1	0,1364	1	0	0,1282	1	0	0,1205	1	0	0,1133
r6	0,2300				1	0	0,2162	2	0	0,2162			
r7	0,1540	4	2	0,1666	2	2	0,1943				1	0	0,1826
r8	0,1507	9	3	0,1695				1	0	0,1593			
r9	0,1406												
r10	0,2300	1	0	0,2231							1	0	0,2097
r11	0,1427	3	1	0,1395				1	0	0,1311			
r12	0,1825												
r13	0,1463	2	1	0,1522	3	1	0,1545				3	2	0,1669
r14	0,2251				3	1	0,2431						
r15	0,1530	2	0	0,1530									
r16	0,1405												
r17	0,1754	2	2	0,1897	2	0	0,1676	1	0	0,1575			

Tabla III.15: Evolución del Paciente pt08 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión	%Progresión
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral			
1	0	0,1383	3	1	0,1404	1	0	0,1320				0,1482	0,0191	11,42%
2	0	0,1205	3	1	0,1223	3	1	0,1150				0,1320	0,0029	2,15%
												0,1150	0,0491	29,95%
1	0	0,1264	2	0	0,1188	2	0	0,1050	2	0	0,1248	0,1248	0,0255	16,97%
			1	0	0,1649							0,1050	0,0403	27,76%
1	0	0,1775	1	0	0,1668	1	0	0,1568	1	0	0,1550	0,1550	0,0112	6,74%
						4	1	0,1954				0,1568	0,0259	14,18%
												0,1954	-0,0233	-13,52%
												0,1757	-0,0026	-1,49%
2	1	0,2195										0,2195	0,0105	4,57%
			2	0	0,1559	1	0	0,1465	3	0	0,1216	0,1216	0,0258	17,48%
			3	1	0,1866							0,1866	-0,0028	-1,52%
1	0	0,1522										0,1522	0,0011	0,75%
												0,2427	---	---
												0,1808	-0,0070	-4,03%
									2	1	0,1563	0,1563	-0,0116	-8,02%
1	0	0,1554										0,1554	0,0375	19,45%
1	0	0,1497	3	0	0,1407	1	0	0,1323	1	0	0,1655	0,1655	-0,0016	-1,00%
4	1	0,1267	4	1	0,1209				4	0	0,1099	0,1099	0,0327	22,94%
												0,1209	0,0318	20,83%
1	0	0,1065	2	0	0,0941	5	2	0,0912	2	0	0,1348	0,1348	0,0178	11,66%
			1	0	0,2032							0,0912	0,0483	34,62%
1	0	0,1716	1	0	0,1613	1	0	0,1516	1	0	0,1910	0,1910	0,0390	16,95%
						3	1	0,1617				0,1516	0,0024	1,54%
												0,1617	-0,0110	-7,29%
												0,1406	---	---
2	1	0,2265										0,2265	0,0035	1,52%
			2	1	0,1416	1	0	0,1331	2	1	0,1438	0,1438	-0,0011	-0,74%
			3	2	0,1853							0,1853	-0,0028	-1,52%
1	0	0,1569										0,1569	-0,0106	-7,24%
												0,2431	-0,0180	-8,00%
												0,1530	0,0000	0,00%
									2	2	0,1638	0,1638	-0,0233	-16,61%
1	0	0,1481										0,1481	0,0274	15,59%
												Media Lado Izquierdo	0,0126	7,68%
												Media Lado Derecho	0,0084	5,35%
												Media TOTAL	0,0105	6,44%

Tabla III.16: Evolución del Paciente pt08 (parte 2)

III.9. Progresión de Miguel (pt09)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1618												
l2	0,1344							1	0	0,1263			
l3	0,1654	1	0	0,1555	1	0	0,1462						
l4	0,1269												
l5	0,1408	2	2	0,1643	6	2	0,1693	4	1	0,1615	1	0	0,1518
l6	0,1838				9	3	0,2046	2	1	0,2210			
l7	0,1431							1	0	0,1345	1	0	0,1264
l8	0,1440	4	1	0,1462	7	5	0,2019	6	0	0,1784	4	0	0,1392
l9	0,1490	2	2	0,1738				1	0	0,1634			
l10	0,1400	7	4	0,1583	3	1	0,1710	8	2	0,1683	2	0	0,1683
l11	0,1456	1	0	0,1369	2	0	0,1369	1	0	0,1287	5	4	0,1647
l12	0,1618	3	1	0,1643	5	0	0,1364	1	0	0,1282			
l13	0,1400	1	0	0,1316	2	1	0,1421	5	3	0,1683	10	3	0,1874
l14	0,2300	7	3	0,2561	1	0	0,2407	2	1	0,2600			
l15	0,1462										12	3	0,1529
l16	0,1328	7	1	0,1191	2	2	0,1389	2	1	0,1500	1	0	0,1410
l17	0,1348	5	2	0,1572	3	0	0,1478	1	0	0,1390	4	2	0,1750
r1	0,1705												
r2	0,1389							2	0	0,1228			
r3	0,1625	3	2	0,1781	6	2	0,1836						
r4	0,1278										1	0	0,1201
r5	0,1378				1	0	0,1295	1	0	0,1217	1	0	0,1144
r6	0,1888				9	2	0,1801	2	0	0,1801			
r7	0,1492												
r8	0,1529	3	1	0,1552	4	2	0,1702	6	2	0,1754	2	1	0,1894
r9	0,1636	2	2	0,1908				1	0	0,1794			
r10	0,1569	7	4	0,1774	2	2	0,2069	8	2	0,1885	8	4	0,2001
r11	0,1508	6	2	0,1373	6	4	0,1868	6	1	0,1782	3	0	0,1675
r12	0,1607	4	1	0,1632	5	1	0,1557	5	2	0,1605			
r13	0,1429	5	1	0,1281	2	1	0,1383				12	6	0,1938
r14	0,2101	3	1	0,2269	1	0	0,2133	2	2	0,2488	1	0	0,2339
r15	0,1526										9	3	0,1698
r16	0,1362	2	0	0,1203	2	1	0,1300	1	0	0,1222	1	0	0,1149
r17	0,1457	5	1	0,1391	3	2	0,1525	1	0	0,1434	2	0	0,1434

Tabla III.17: Evolución del Paciente pt09 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)			Sesión 6 (31/07)			Sesión 7 (01/08)			Sesión 8 (02/08)			Umbral Final	Progresión	%Progresión
Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral			
3	1	0,1364				1	0	0,1374	4	0	0,1133	0,1618	---	---
												0,1133	0,0211	15,70%
												0,1374	0,0280	16,91%
									2	0	0,1269	0,1269	0,0000	0,00%
												0,1518	-0,0110	-7,82%
									1	0	0,2077	0,2077	-0,0239	-13,03%
												0,1264	0,0167	11,65%
7	1	0,1173	10	3	0,1155	1	0	0,1086				0,1086	0,0354	24,60%
1	0	0,1536	1	0	0,1444	9	1	0,1295				0,1295	0,0195	13,09%
6	0	0,1683	3	0	0,1398	10	2	0,1510				0,1510	-0,0110	-7,86%
5	0	0,1548	2	0	0,1368	8	1	0,1153	3	0	0,1084	0,1084	0,0372	25,55%
						3	1	0,1301				0,1301	0,0317	19,59%
5	1	0,1682										0,1682	-0,0282	-20,12%
			2	0	0,2297	3	1	0,2332				0,2332	-0,0032	-1,40%
			4	1	0,1459							0,1459	0,0003	0,21%
9	2	0,1207	7	2	0,1244	3	2	0,1365	2	1	0,1365	0,1365	-0,0037	-2,79%
2	0	0,1645	3	0	0,1366							0,1366	-0,0018	-1,34%
3	1	0,1864							1	0	0,1603	0,1603	0,0102	6,00%
									3	0	0,1020	0,1020	0,0369	26,57%
												0,1864	-0,0239	-14,71%
						1	0	0,1129	2	1	0,1219	0,1219	0,0059	4,59%
						2	1	0,1236				0,1236	0,0142	10,30%
									1	0	0,1693	0,1693	0,0195	10,33%
												0,1492	---	---
9	1	0,1597	8	3	0,1672	4	1	0,1596				0,1596	-0,0067	-4,38%
1	0	0,1686	1	0	0,1585	9	5	0,1791				0,1791	-0,0155	-9,47%
6	2	0,2062	6	0	0,1610	3	2	0,1765				0,1765	-0,0196	-12,48%
1	0	0,1575	2	0	0,1392	1	0	0,1308	2	1	0,1413	0,1413	0,0095	6,30%
						5	1	0,1629				0,1629	-0,0022	-1,37%
5	0	0,1610										0,1610	-0,0181	-12,68%
			2	0	0,2067	3	1	0,2098				0,2098	0,0003	0,14%
			1	0	0,1596							0,1596	-0,0070	-4,60%
11	1	0,0804	8	1	0,0678	9	5	0,0937	2	1	0,1012	0,1012	0,0350	25,70%
2	0	0,1434	4	1	0,1368	1	0	0,1286				0,1286	0,0171	11,74%
												Media Lado Izquierdo	0,0067	4,56%
												Media Lado Derecho	0,0035	2,74%
												Media TOTAL	0,0051	3,59%

Tabla III.18: Evolución del Paciente pt09 (parte 2)

III.10. Progresión de Víctor (pt10)

Pose ID	Sesión 0 (Calibración)	Sesión 1 (22/07)			Sesión 2 (24/07)			Sesión 3 (25/07)			Sesión 4 (26/07)		
	Umbral Inicial	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral	Intentos	Fallos	Umbral
l1	0,1645	2	0	0,1645	9	3	0,1618	3	2	0,1774	3	2	0,1801
l2	0,2300	6	2	0,2268									
l3	0,2300												
l4	0,1732	4	2	0,1801	4	1	0,1761	1	0	0,1681	2	0	0,1681
l5	0,2073	11	8	0,2667									
l6	0,2300												
l7	0,2300												
l8	0,2300	5	3	0,2588	1	0	0,2433	1	0	0,2287	2	0	0,2021
l9	0,1985												
l10	0,2300	9	7	0,2982									
l11	0,2182												
l12	0,2300												
l13	0,1411				1	0	0,1326	1	0	0,1246	2	2	0,1454
l14	0,2300	4	4	0,2795									
l15	0,2300												
l16	0,1379	1	0	0,1338	6	2	0,1380	1	0	0,1297			
l17	0,1293				2	1	0,1396	1	0	0,1312			
r1	0,1643				9	2	0,1496	3	1	0,1518	3	0	0,1427
r2	0,2206	6	1	0,2092									
r3	0,2300	2	0	0,2300									
r4	0,1275	4	3	0,1434	4	2	0,1478	1	0	0,1389	2	1	0,1500
r5	0,1515	9	5	0,1733									
r6	0,2300	2	1	0,2396									
r7	0,2300												
r8	0,1628	3	2	0,1761	1	0	0,1655	1	0	0,1556	2	0	0,1375
r9	0,1775												
r10	0,2300	9	7	0,2982									
r11	0,1638												
r12	0,2300												
r13	0,1652				1	0	0,1553	1	0	0,1460	2	0	0,1460
r14	0,2300	4	4	0,2588									
r15	0,2095	2	0	0,2095									
r16	0,1555	1	0	0,1508	6	2	0,1555	1	0	0,1462			
r17	0,1323				2	2	0,1543	1	0	0,1450			

Tabla III.19: Evolución del Paciente pt10 (parte 1)

Sesión 5 (27/07)	Sesión 6 (31/07)	Sesión 7 (01/08)	Sesión 8 (02/08)	Umbral Final	Progresión	%Progresión
Intentos Fallos Umbral	Intentos Fallos Umbral	Intentos Fallos Umbral	Intentos Fallos Umbral			
				0,1801	-0,0156	-9,48%
				0,2268	0,0032	1,38%
				0,2300	---	---
				0,1681	0,0051	2,94%
				0,2667	-0,0594	-28,64%
				0,2300	---	---
				0,2300	---	---
				0,2021	0,0279	12,13%
				0,2300	---	---
				0,2982	-0,0682	-29,65%
				0,2182	---	---
				0,2300	---	---
				0,1454	-0,0043	-3,02%
				0,2795	-0,0495	-21,52%
				0,2300	---	---
				0,1297	0,0082	5,93%
				0,1312	-0,0019	-1,49%
				0,1427	0,0216	13,15%
				0,2092	0,0115	5,19%
				0,2300	0,0000	0,00%
				0,1500	-0,0225	-17,65%
				0,1733	-0,0218	-14,41%
				0,2396	-0,0096	-4,17%
				0,2300	---	---
				0,1375	0,0253	15,54%
				0,1775	---	---
				0,2982	-0,0682	-29,65%
				0,1638	---	---
				0,2300	---	---
				0,1460	0,0192	11,62%
				0,2588	-0,0288	-12,52%
				0,2095	0,0000	0,00%
				0,1462	0,0093	6,00%
				0,1450	-0,0127	-9,63%
				Media Lado Izquierdo	-0,0155	-7,14%
				Media Lado Derecho	-0,0059	-3,12%
				Media TOTAL	-0,0101	-4,69%

Tabla III.20: Evolución del Paciente pt10 (parte 2)

Anexo IV

Artículo Elaborado y Aceptado para la Conferencia *ROBOT'2017 - Third Iberian Robotics Conference*

En este último Anexo, se incluye el artículo elaborado para la *ROBOT'2017 - Third Iberian Robotics Conference*¹, en el cual se expone parte del desarrollo realizado para la adaptación de la plataforma NaoTherapist de cara al campamento [G. Estévez et al., 2017], concretamente de la parte de Planificación Automática de las Sesiones. Este artículo fue presentado en Julio de 2017, y tras una revisión solicitada por la Organización de la Conferencia, fue definitivamente aceptado el 1 de Septiembre de este mismo año.

ROBOT'2017 es organizado por la Sociedad Española para la Investigación y Desarrollo en Robótica (SEIDROB) y la Sociedad Portuguesa de Robótica (SPR), con la colaboración de la “Red de Agentes Físicos” y el apoyo de la Red Española de Robótica y Mecatrónica (REDROM). Esta conferencia será celebrada en los días 22-24 de Noviembre, en la ciudad de Sevilla.

¹<https://grvc.us.es/robot2017/> - Ultimo acceso el 21/09/2017

Enhancing a Robotic Rehabilitation Model for Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy

Enrique García Estévez¹, Irene Díaz Portales, José Carlos Pulido,
Raquel Fuentetaja, and Fernando Fernández

Computer Science and Engineering, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, Spain

Abstract. NAOTherapist is a robotic framework that aims at developing socially-interactive rehabilitation sessions for pediatric patients with physical impairments. Although this therapeutic tool has been already assessed with the target patients in a long-term evaluation, the system is planned to participate in an Hand-Arm Bimanual Therapy Camp for Cerebral Palsy patients. This presents new challenges and requirements that must be considered to provide a better daily experience to the involved participants. This work describes how the robotic rehabilitation model used in the previous version of the platform has been improved for both the inclusion of new games and the individual adaptation.

Keywords: socially assistive robotics, hand-arm bimanual intensive therapies, robotic rehabilitation model, NAOTherapist

1 Introduction

Child neurorehabilitation therapies seek to achieve the recovery of damaged neuronal zones and atrophied muscles by the repetition of different therapeutic exercises, both physical and cognitive. There is a special modality of these therapies, which are currently in the ascendant, for children with psychomotor problems, in the form of Intensive Therapy Camps, such as the Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy (HABIT) [1], created at Columbia University.

The goal of HABIT is to help children to improve the dexterity and coordination of both arms in daily functions. The kind of treatment applied has demonstrated to be very effective [Gordon 2007, 2008]. Its success lies in the application of a daily intensive therapy based on some key concepts such as many repetitions with exercise variability [8], progressive increase of complexity, motivation [7], and positive feedback [11]. These concepts represent, in short, the needs of children patients in their rehabilitation process.

HABIT is accomplished in the form of a camp of 20 consecutive days, instead of the 4 months (with 1 session per week) that formed the long-term evaluation done before. It is especially aimed at children with hemiplegia and ages between 5 and 13 years. During the camp, the children must perform a multitude of therapeutic activities, hidden under a relaxed atmosphere of play. These activities, in turn, must respect the individualized treatment, being personalized according to the needs of each patient. In 2017, an HABIT camp is going to be implemented

for the first time in Spain. This camp edition will incorporate daily special sessions with an humanoid robot, the NAOTherapist system. This robot represents a support tool for therapists as well as a toy for children allowing them having fun and be motivated while doing the therapy.

A rehabilitation model is a specific way of conducting therapy sessions, in order to achieve a better recovery of patients. Following this, NAOTherapist is a robotic model that allows a NAO robot to behave autonomously for carrying out interactive rehabilitation sessions. In these sessions, the NAO performs a set of previously defined poses, which the patient should then imitate correctly [5]. The robot is used together with the motion sensor Kinect V2, which facilitates to check the patient's pose and react to it, helping him to correct it if necessary.

The goal of the incorporation of NAOTherapist in the HABIT camp is to increase the type of activities that the kids can perform, through the execution of sessions with the robot. Since sessions will be in consecutive days, it is very important to design a type of interaction able of maintaining the child motivation along these days. This paper describes the design of the additional activities developed, in the form of games, and explains how these new activities have been included into the NAOTherapist model. Their design follows the principles of HABIT of repetitive exercises and variability while the use of game environments, which is expected to increase children motivation and engagement to the camp, even more that the given with the robot's own presence as a therapist.

Additionally, an effort has been done in order to achieve a much more better and fluid interaction [2], in which even the robot and the patient can change roles. Specifically, in one of the designed games the child teaches the robot how to perform poses that the robot must imitate. We believe this game can generate an additional motivation to that the given by the robot's own presence as a therapist. Regarding the positive reinforcement given by the robot, we have included a reward system adapted to the patient's performance during the exercise execution. This reward system includes a great variety of animations. Likewise, due to the possible heterogeneity of the patients, we have also included new mechanisms of adaptation considering the progress made by the patient to determine the difficulty of the exercises. An experimentation is included too, directly related to the automated planning of sessions, that tries to show the effects on planning times of the changes made with the new model.

2 NAOTherapist Background

This section is a high-level description of the NAOTherapist system as it was before the incorporation of the new features proposed in this paper.

The main goal of NAOTherapist is to provide a social robot with sufficient autonomy to guide patients in a rehabilitation therapy of upper limbs without physical contact. One of the objectives of the project is to increase patient motivation and engagement in rehabilitation sessions, something specially important in pediatric therapies. To achieve that, the NAOTherapist system is controlled by a cognitive architecture that allows to generate fluid robot-patient interaction.

This architecture comprises three levels of Automated Planning [5]: hierarchical planning in the therapy level and path planning in the low level (movements of the robot). In the medium level, Automated Planning (AP) is used. AP is an Artificial Intelligence technique that is used to find a plan of actions while respecting the model constraints [4]. The model of the game-like activities corresponds to the medium-level of planning of the architecture, where the schemes of the possible actions and state of world are represented in Planning Definition Domain Language (PDDL) predicates [3]. Then, a planner is in charge of finding the set of ordered actions that fulfills the goals from the initial state. The specific planner used in this case is Metric-FF [6]. It is able to generate valid plans composed of medium-level actions that will be later executed by the robot.

The initial model of domain actions designed for NAOTherapist allows the robot to perform two types of games, namely the *Mirror* [9] and the *Simon* [12]. This domain model is the responsible for including the types of activities designed in the planning of the therapy sessions, so then the robot can perform them in the rehabilitation process.

In the Mirror game, the robot shows a set of preset postures by the therapist, which the patient must correctly imitate and maintain for a given period of time. While the patient imitates each of these poses, it is monitored that they are performed correctly, with the help of a 3D motion sensor. A common threshold is used for all patients for checking correctness. In case the patient pose is not considered correct, the system directs the interaction to provide instructions to the patient for correcting the pose. There are two more attempts, with two different types of corrections. First, the robot corrects the patient verbally, indicating which arm should be corrected (or both arms if applicable). In the second correction, the robot imitates the patient's posture and shows him how to move the arms from that posture to achieve the correct pose. In this way, each exercise of therapy consists only of a set of poses that the robot shows and that the patient should try to imitate ¹.

The Simon game is an adaptation of the Electronic Simon, but using poses instead of colors. This activity consists of the following: the robot performs one or several poses in a row, which the patient must memorize and repeat correctly and in the same order. The difficulty of this game increases as rounds are completed, increasing the number of poses to memorize. This activity works to a greater extent the cognitive side of the patients, in addition to physics, being a good type of exercise for therapies.

The effectiveness of the initial NAOTherapist system with the Mirror game was evaluated in schools and at the Hospital Universitario Virgen del Rocio in Seville, Spain, with the participation of more than 120 healthy children and a few children with different deceases, respectively [10]. The evaluation was based on questionnaires to participants, family and experts, as well as the analysis of the interaction in videos and system logs. The results showed that the motivation and commitment of the children during the therapy sessions increased considerably, although the majority of respondents considered that there were open issues

¹ Video of the use case: <https://goo.gl/LaiajG>

about the interaction with the robot, with the goal of achieving a more fluid and less artificial interaction ².

For an intensive therapy, as the one of HABIT, only two types of activities or exercises are not enough. The continuous repetition of the same exercises in a short period of time can lead to a lack of motivation in patients over time. Therefore, we have designed, with the help of the therapists, the new types of activities that are described in this paper. It has also been necessary to adapt the old Simon game, called from now on *Memory*. This was done with the aim of achieving a greater integration of the different types of exercises in the same session without stopping it to start a new type of activity.

3 Task modeling of the new activities

This section is a high-level description of the NAOTherapist model for the game-like activities. This model has been enhanced with the new designed activities. In this section we describe first the general execution flow, which is common to all therapy sessions. Then, we introduce the description of the execution flow of every new specific activity.

The NAOTherapist model for game-like activities is expressed by the domain and problem of the planning task in the medium-level of the architecture. The domain is described in PDDL, and contains all possible actions that can be carried out in a therapy session. These actions are expressed in a generalized way using variables, such that their definition is independent of the particular activities and poses included in a specific therapy session. Instead of using a different planning domain for every game, we have integrated all new game-like activities with the previous ones into the same planning domain. This allows the planning of every therapy session is performed using the same domain, which provides a robust and flexible solution where the information about all the possible actions involved in a session are centralized in the same domain file.

Figure 1 shows the general execution flow of the plan generated by the domain model for a therapy session. It is composed of four main phases: welcome, training, give-reward and farewell. A therapy session always starts with a welcome phase. There are four domain actions the robot performs in this phase: (1) detect that the patient is in front of it; (2) identify who is the patient; (3) greet the identified patient; and (2) start the training, that typically involves some speech acts for indicating that the training is about to start.

After the welcome, the training phase starts. For the training phase, the general execution flow contains an action to introduce the corresponding exercise, the set of actions of the corresponding game-like activity of the session, and another action to finish the exercise. In the low level, the **Introduce-exercise** and **Finish-exercise** actions usually correspond to speech acts. The current game-like activities defined in the integrated domain are: mirror, memory, inverse memory, teaching NAO, dance with NAO and NAO says. The execution flow for these activities will be explained later in the next subsections.

² Video of the initial evaluation: <https://goo.gl/tmkMcv>

When the training phase is finished there is a give-reward phase that allows to provide reward to the patient after each exercise. This reward can be of different intensity (high, medium-high, medium-low or low) depending on the patient and on his performance of the activity. An example of a high reward is to make a fun dance, while a lower reward would be a simple speech act.

Several game-like activities can be included into the same therapy session. If this is the case, the session does not finish after a give-reward phase, but continues with a new training phase. Otherwise, the execution flow goes to the farewell phase. This is the final phase of therapy sessions, including the actions **finish-training**, **say-good-bye** and **finish-session**. At the low level, these robot actions consist of speech acts and movements associated to these speech acts, as saying goodbye by moving the hand or sitting in a rest position by the end of the session.

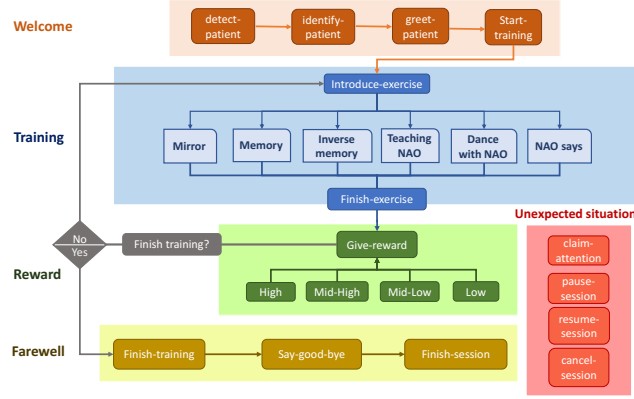


Fig. 1. General flow of the integrated domain.

3.1 Teaching NAO Game

The *Teaching NAO* game implies a change of roles, in which the patient becomes the therapist showing poses to the robot that it should imitate later. The child is the protagonist of the therapy acting as an active subject and directing the session. In this way, the patient works to a greater extent the executive function of the movements' planning, not just having to imitate another subject. He has to take the responsibility of being a *good* teacher. We expect that having such a greater prominence within the therapy, his motivation and involvement in the exercises increase drastically.

The possible poses that the child can teach are defined in a catalogue. This catalogue is available for both, the child and the therapist so that they can select which pose to teach. The execution flow of this activity is detailed in Figure 2. First, the robot asks the patient to teach it to perform a new pose, which is supposed to be unknown for the robot. Once the child performs the new pose,

advised or not by the therapist, and holds it for a few seconds, the robot identifies that pose as a new one. It is considered as a new pose in the sense that though it was within the catalog of possible poses, but it was not being used in the sessions so far. It is at this moment when the robot tries to imitate the same pose shown by the child. In order to give a certain realism to this situation, a random component is introduced to simulate that the robot fails somehow to imitate the pose, being rather different from the one taught by the child. In case the robot's pose is wrong, it realizes of its error. Then, it asks the child to remind him the correct pose again, in order to try doing it correctly again. The same can be done several times in a row, with different poses to teach.

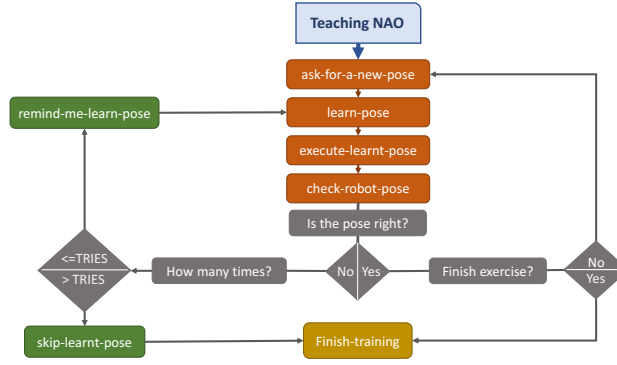


Fig. 2. Execution flow of the Teaching NAO game.

3.2 NAO Says Game

Another game designed specifically for hand-arm bimanual therapies is the "NAO Says" game. This game is very similar to the well-known game of *Simon Says*, where the robot takes the role of *Simon* and issues instructions to the child. The kind of instructions given by the robot may consist of touching a part of the body (for example, NAO says *touch your shoulder*), or adopting a basic stance (NAO says *sit down*). In the same way as in the *Mirror* game, if the child does not perform the request correctly, the robot corrects him in different ways until reaching the maximum number of attempts or until he performs it correctly. In the case of touching a part of the body, the child can do it with either hand, since the method for monitoring this exercise checks the distance between the main parts of the body and both hands.

This exercise provides a more cognitive aspect to the therapy. It works to a greater extent verbal comprehension, and planning and sequencing of patient movements. In order to perform this activity correctly, the child must have good body awareness and good proprioception.

3.3 Dancing with NAO Game

Finally, as another novelty we have included the *Dancing with NAO* game. This activity is very similar to the exercise of *Mirror*, but hidden under a greater and distended atmosphere of game, more specifically of dance.

The execution flow of this game is as follows. The robot first tells the child that he is going to teach him a dance. Then, it reproduces the dance choreography completely. After that, the robot teaches the dance to the child step by step. This part of the game is very similar to *Mirror*, since here the robot shows different poses that the patient must imitate one by one. When all different poses belonging to the dance choreography have been completed and the child has learned the dance, the robot asks the patient to try to dance together.

For the point of view of the cognitive aspect, it exercises memory and procedural memory, since the robot performs first the sequence of poses one by one with the aim of carrying out all of them in a row afterwards, similarly to the *Memory* game.

3.4 Other Improvements

In addition to the design of the new types of activities, we have also worked on improving the planning of the *Mirror* and *Simon* exercises, previously designed. This has tried to overcome some of the problems of integration between these exercises, which made it difficult to combine the two in a single therapy session without interruptions. This improvement also allows a greater configurability of the sessions for the therapists, being able to take a greater number of decisions regarding their design.

As for the *Mirror*, we have worked on a new flow of actions, which allows to define in the problems the number of attempts that the patient will have to correctly perform a pose, which was previously preset in two attempts. This is directly related to corrections to be made by NAO in case of patient failures. Now, also the types of corrections can be defined by the therapist, being able to change between visual corrections (mirroring or reminder) or corrective aural (direct or indirect). In this way, actions like `skip-pose` or `check-pose` are no longer controlled at low level, but are planned at the high level.

Besides, a complete update of the game of *Simon* has been made, now called *Memory*. Previously, the activities of the *Mirror* and *Memory* were within the same domain, but did not share any action, not even the beginning and end of the session, so that their integration into the same session was very costly. Now, the flows of both activities share many actions, the *Memory* having only four actions of its own. By sharing some actions of the flow of the *Mirror*, the robot can execute all the poses of the sequence of a round one after another without waiting for the patient to perform them, and then on the child's check, and correct them if necessary, one by one. To differentiate both flows, specific end-of-year actions for each type are included, where, thanks to an exercise-type predicate, the planner knows which way to go.

The *Simon* readjustment motivated another type of exercise where the patient should perform the poses of the sequence, but in reverse order. For this, a modification of the *Memory*, called *Inverse Memory*, was designed, whose development was possible with the implementation of only two extra actions, generating an additional flow. An action with which the robot executed the poses in reverse order to the one indicated in the problem, and another with which to spend the turn to the child at the end of all the poses of the corresponding round.

4 User adaptation system

Another factor of great importance in rehabilitation therapies, which has been significantly improved in the face of the intensive care camp, is the user adaptation. In these therapies, adaptation to the patients can be understood in two ways: one related to the configuration of the sessions, adapting the exercises and poses to the particular needs of each patient; and another in the difficulty of the session, hidden under the decision of the robot to mark a pose as correctly performed or not.

The UML diagram in Figure 3 shows the conceptual model of the design of the therapies. It is adaptable to the needs and characteristics of the patients by only changing the the attributes or parameters observable in the figure.

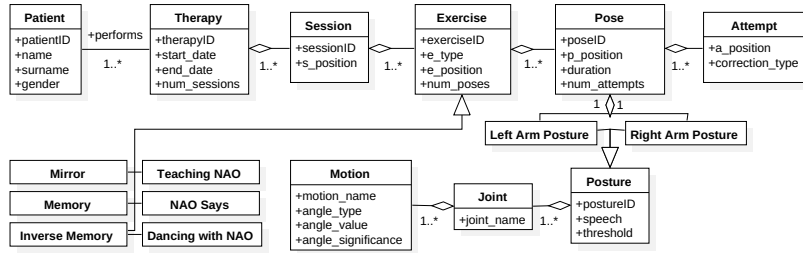


Fig. 3. User Adaptation Model.

Concerning the first way of user adaptation, when configuring a therapy for a given patient, firstly the therapist have to set out their personal data and the duration of the therapy. Next, each of the sessions that will make up the therapy are designed. Each session must be assigned an order of completion, and the exercises that comprise it must be determined. There may be several types of exercises in the same session. Then, for each exercise, the therapist must also establish the poses that will compose the exercise. For every pose he has to indicate the order of execution and the time that the patient must maintain the pose. A pose is composed by two postures, one for the left arm and another one for the right arm. The postures that the therapist considers appropriate for the patient are selected from the catalog of available ones.

This whole process will be carried out through an easy-to-use graphical interface developed by the team, facilitating the task of the therapist's design. In this way, the therapeutic activities to be performed are adapted the patient according to their clinical needs. Modifying the type of exercises, the child can perform a therapy with more emphasis on the cognitive aspect or more physical depending on their illness. Modifying the postures chosen for the poses of the exercises, the children can exercise more some joints than others.

Secondly, another way of user adaptation was developed, the system of threshold comparison for postures, which works much more dynamically. There are two thresholds, one for the left posture and another one for the right posture. These thresholds indicate how permissive is the robot while classifying a pose performed by the child as correct. Thresholds are patient dependent and vary dynamically as the therapy session advances, impacting this on the difficulty (permissiveness) of the following exercises and sessions. In case the patient does not perform a pose correctly, the corresponding threshold increases to a small extent before the next attempt, if any, or the next time the same pose is performed. Conversely, if the pose is correctly imitated on the first attempt, this threshold is reduced, making things difficult for subsequent occasions. The thresholds achieved by the child in each session are maintained for the next one, so that the evolution of the user can be observed throughout the therapy just by observing how these thresholds have been varying.

For the computation of the similarity, there is a significance value related to every joint, so that the significance of the motion of each posture can be modified by the therapists who supervise the sessions. By placing a lower significance for a particular joint motion the calculated distance between the angle set in the pose performed by the child and the angle set of the robot pose will be lower. Thus, the difficulty can be reduced only for a specific joint motion. This is suitable for those users who have serious mobility problems in a specific joint and motion.

To achieve an adaptation to the user in this sense from the outset, firstly, a calibration exercise must be performed. In this exercise, the robot does not correct the poses, but merely observes how the child imitates them under the supervision of a therapist, increasing or reducing the thresholds largely according to how well he does it. Thanks to this calibration, one of the fundamental parts is that the system allows the therapists to program the tasks of each activity with the appropriate adjustments to the joint range of each of the patients, thus favoring an individualization and the adjustment of the treatment.

5 Results

In order to evaluate the performance of the new domain and compare it to the previous ones, we have designed two experimental tests. The first one is oriented to compare the performance in isolated activities; and the second one is configured to be more similar to a real therapy session with a mixed problem containing several activities. For the planning component of the architecture, we

used the Metric-FF planner [6] for generating the robot plans, running in a PC with the following configuration: Intel Core i3, 3.30GHz x 4, and 8 GB of RAM.

For the first test we have created a two common configurations of the planning problem, one based on the *Mirror* activity that comprises 10 *Mirror* exercises and 5 poses for each one; and another one based on the *Simon* or *Memory* game, with 1 single exercise composed of 10 poses or rounds to complete.

Table 1 shows the results for the two game configurations comparing the planning time and the number of actions in both domains, the old ones and the new integrated version. As it can be observed there are changes in planning time between the old versions of the *Mirror* and *Simon* domains, and the new domain presented in this paper. This new version, as already mentioned, integrates both activities, in addition to adding four new types of exercises.

Hoja1					
		Old Domain	New Domain	Old Domain	New Domain
Type of Activity		Mirror		Simon / Memory	
Domain Description	Num. Types	10	22	9	22
	Num. Predicates	26	44	15	44
	Num. Functions	6	14	12	14
	Num. Actions	22	51	15	51
	Shuffling	-		Yes	No
Problem Description	Num. Exercises	10		1	
	Num. Poses/Ex.	5		10 (turns)	
Generated Plan	Total Time (s)	0.02	0.19	0.77	0.01
	Total num. Actions	146	207	281	197

Table 1. Old vs. New Domains Results.

The problem in the *Mirror* game can be considered as the worst case, since normally the therapy sessions will include no more than 5 exercises. A small increment of the total time of the plan generation can be observed, going from 0.02 seconds to 0.19 seconds, with 146 and 207 actions respectively. However, this increment in planning time can be assumed by the NAOTherapist architecture, since 0.19 seconds are not enough to negatively influence the interaction between robot and patient, since the robot's response to any event is almost immediate.

Regarding the planning times of generating a valid plan of the *Simon* or *Memory*, it is significantly reduced, from 0.77 seconds to 0.01, despite using a new version of the domain that integrates different types of exercises, not one specific to the "Memory". This is because in the old domain of the "Simon", a technique of shuffling of the poses was used to randomize its order in the game. This functionality was eliminated in the new version because the therapists demanded to have a greater control on the order of realization of the poses.

For the second part of the experimentation, we decided to find and execute a plan of a problem that could be used in a demonstration session of therapy, which includes the 6 types of activities developed so far, with 2 poses to be performed in each of them ³. The results are shown in Table 2. The plan generated by the Metric-FF planner takes a total of 0.03 seconds to complete, adding a total of 91

³ Video of the virtual execution of the 6 activities: <https://goo.gl/Zte7mQ>

actions, which are broken down by activities in Table 2. This table also includes, as an example, a part of the generated plan of a *Teaching NAO* exercise.

		Mix. problem	Generated Plan Example
Activities		1. Mirror	...
		2. Dancing	62: INTRODUCE-EXERCISE TEST-TEACHME NAO PT00 SES1 TEACH-ME
		3. Memory	63: START-EXERCISE TEST-TEACHME NAO PT00 STAND-UP TEACH-ME
		4. Inv. Memory	64: ASK-FOR-A-NEW-POSE TEST-TEACHME P_ID8 NAO PT00 STAND-UP
Problem Description	Num. Exercises	6	65: LEARN-POSE P_ID8 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN T2 ...
	Num. Poses/Act.	2	66: EXECUTE-LEARNT-POSE P_ID8 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...
	Total Time (s)	0,03	67: SEQUENCE-CHECK-POSE P_ID8 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...
	Total Num. Actions	91	68: FINISH-LEARNT-POSE P_ID8 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...
Generated plan	General Flow actions	7	69: ASK-FOR-A-NEW-POSE TEST-TEACHME P_ID9 NAO PT00 STAND-UP
	Mirror actions	11	70: LEARN-POSE P_ID9 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...
	Dancing actions	11	71: EXECUTE-LEARNT-POSE P_ID9 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...
	Memory actions	18	72: SEQUENCE-CHECK-POSE P_ID9 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...
	Inv. Memory actions	18	73: FINISH-LEARNT-POSE P_ID9 TEST-TEACHME PUNKNOWN PUNKNOWN ...
	Teaching actions	15	74: FINISH-INDIVIDUAL-EXERCISE TEST-TEACHME NAO PT00 TEACH-ME
		NAO Says actions	11
			75: CALC-PERCENTAGE-ATTEMPTS-FAILED TEST-TEACHME NAO PT00 ...
			76: GIVE-PATIENT-HIGH-REWARD TEST-TEACHME NAO PT00 ...
			...

Table 2. Mixed Problem Results.

Generally, increments in planning times compared to the previous architecture and domain can be observed, although this does not affect the interaction between patient and robot during the execution of the therapy session. This increment in time is due to the integration in the same domain of all types of activities, which implies a greater number of types, predicates, functions and actions with which the planner must generate a plan. However, even if it is lost in planning time, we gain in the integration of exercises in the same session, now allowing the results of one exercise to have an impact on a later one. For example, a pose learned by the robot in a *Teaching NAO* exercise can be used in the same session in another type of exercise as the *Mirror*.

6 Conclusions

In this paper we have introduced and evaluated an enhanced domain model for the NAOTherapist platform, that provides the NAO robot with the ability of performing new game-like activities and direct therapy sessions adapted to the needs of Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy (HABIT). From the planning perspective, we have obtained a general, robust and flexible solution based on a unified and integrated planning domain. This domain allows generating plans for therapy sessions composed by several activities.

In the face of the HABIT camp, the participation of the NAOTherapist platform is expected to have very positive effects on the patients' experience. We expect to improve the children engagement with dynamic sessions that involve them in a funny game environment, so that they can forget that they are in a rehabilitation session.

With the evaluations to be perform in the camp, we expect to show the ability of the improvements on the architecture and models to enhance the attention and motivation of the children. These evaluations will be focused on measuring the children capacity of overcoming, the level of engagement with the therapy, and the level of improvement from the clinical point of view. Additionally, we

want to test the adaptation model to see if this model achieves a reasonable adaptation to every specific patient. Also, we will analyze if the architecture provides enough information to have an acceptable adaptation system that is compatible with the clinical goals.

Acknowledgment

This work has been partially funded by the European Union ECHORD++ project (FP7-ICT-601116) and the TIN2015-65686-C5.

References

1. Charles, J., Gordon, A.M.: Development of hand-arm bimanual intensive training (habit) for improving bimanual coordination in children with hemiplegic cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology* 48(11), 931–936 (2006)
2. Fasola, J., Mataric, M.: A socially assistive robot exercise coach for the elderly. *Journal of Human-Robot Interaction* 2(2), 3–32 (2013)
3. Fox, M., Long, D.: PDDL2.1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains. *J. Artif. Intell. Res. (JAIR)* 20, 61–124 (2003)
4. Ghallab, M., Nau, D., Traverso, P.: *Automated planning: theory & practice* (2004)
5. González, J.C., Pulido, J.C., Fernández, F.: A three-layer planning architecture for the autonomous control of rehabilitation therapies based on social robots. *Cognitive Systems Research (CSR)* 43, 232–249 (June 2017)
6. Hoffmann, J.: The Metric-FF Planning System: Translating “Ignoring Delete Lists” to Numeric State Variables. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)* 20(1), 291–341 (2003)
7. Kleim, J.A., Jones, T.A.: Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of speech, language, and hearing research* 51(1), S225–S239 (2008)
8. Magill, R.A., Hall, K.G.: A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Human movement science* 9(3), 241–289 (1990)
9. Pulido, J.C., González, J.C., Fernández, F.: NAOTherapist: Autonomous Assistance of Physical Rehabilitation Therapies with a Social Humanoid Robot. In: *Proceedings of the International Workshop on Assistive & Rehabilitation Technology (IWART)*. pp. 15–16. Elche, Spain (Dec 2016)
10. Pulido, J.C., González, J.C., Suárez-Mejías, C., Bandera, A., Bustos, P., Fernández, F.: Evaluating the child–robot interaction of the naotherapist platform in pediatric rehabilitation. *International Journal of Social Robotics* pp. 1–16 (2017)
11. Schmidt, R.A.: *Motor Control and Learning* 5th Edition. Human kinetics (1988)
12. Turp, M., Pulido, J.C., González, J.C., Fernández, F.: Playing with Robots: An Interactive Simon Game. In: *Proceedings of the 16th Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence (CAEPIA), RSIM workshop*. pp. 1085–1095. Albacete, Spain (November 2015)

